



**Universidad Nacional Mayor de San Marcos**

**Universidad del Perú. Decana de América**

Dirección General de Estudios de Posgrado  
Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y  
Geográfica  
Unidad de Posgrado

**Optimización del diámetro de taladros en el  
sostenimiento de macizos rocosos con pernos de roca  
y sus efectos ambientales**

**TESIS**

Para optar el Grado Académico de Doctor en Ciencias  
Ambientales

**AUTOR**

Emiliano Mauro GIRALDO PAREDEZ

**ASESOR**

Ernesto Osvaldo ADUVIRE PATACA

Lima, Perú

2020



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

## Referencia bibliográfica

---

Giraldo, E. (2020). *Optimización del diámetro de taladros en el sostenimiento de macizos rocosos con pernos de roca y sus efectos ambientales*. Tesis para optar el grado de Doctor en Ciencias Ambientales. Unidad de Posgrado, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.

---

## **HOJA DE METADATOS COMPLEMENTARIOS**

**CODIGO ORCID DEL AUTOR:** 0000-0003-2632-8998

**CODIGO ORCID DEL ASESOR:** 0000-0002-0214-0125

**DNI:** 08635711

**GRUPO DE INVESTIGACIÓN:**

**INSTITUCIÓN QUE FINANCIA PARCIAL O TOTALMENTE LA INVESTIGACIÓN:**

AUTOFINANCIADO

**UBICACIÓN GEOGRÁFICA DONDE SE DESARROLLÓ LA INVESTIGACIÓN. DEBE INCLUIR LOCALIDADES Y COORDENADAS GEOGRÁFICAS**

**UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS**

**Longitud:** -76.7425500

**Latitud:** -7.0787100

**AÑO O RANGO DE AÑOS QUE LA INVESTIGACIÓN ABARCÓ:**

2014 - 2019





# UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

Universidad del Perú, Decana de América

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA

UNIDAD DE POSGRADO



## ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

### SUSTENTACIÓN PÚBLICA

En la Universidad Nacional Mayor de San Marcos-Lima, a los treinta días del mes de enero del 2020, siendo las 15:00 horas, se reúnen los suscritos miembros del JURADO EXAMINADOR DE TESIS, nombrado mediante Dictamen N.º 927/UPG-FIGMMG/2019 del 20 de diciembre del 2019, con la finalidad de evaluar la sustentación oral de la siguiente tesis:

#### TITULO

«OPTIMIZACIÓN DEL DIAMETRO DE TALADROS EN EL SOSTENIMIENTO DE MACIZOS ROCOSOS CON PERNOS DE ROCA Y SUS EFECTOS AMBIENTALES»

Que, presenta el Mg. **EMILIANO MAURO GIRALDO PAREDEZ**, para optar el **GRADO ACADÉMICO DE DOCTOR EN CIENCIAS AMBIENTALES**.

El secretario del Jurado Examinador de la Tesis, analiza el expediente N.º 06015-FIGMMG-2013 del 12 de agosto del 2013, en el marco legal y Estatutario de la Ley Universitaria, acreditando que tiene todos los documentos y cumplió con las etapas del trámite según el «Reglamento de los Estudios de Maestría y Doctorado».

Luego de la Sustentación de la Tesis, los miembros del Jurado Examinador procedieron a aplicar la escala descrita en el Art. 61 del precitado Reglamento, correspondiéndole al graduando la siguiente calificación:

BUENO (16)

Habiendo sido aprobada la sustentación de la Tesis, el Presidente recomienda a la Facultad se le otorgue el **GRADO ACADÉMICO DE DOCTOR EN CIENCIAS AMBIENTALES** al Mg. **EMILIANO MAURO GIRALDO PAREDEZ**

Siendo las 16:00 horas, se dio por concluido al acto académico

  
DR. ARÍSTIDES SOTOMAYOR CABRERA  
Presidente

  
DR. JORGE ENRIQUE SOTO YEN  
Secretario

  
DR. HUMBERTO IVÁN PEHOVAZ ÁLVAREZ  
Miembro

  
DR. ERNESTO OSVALDO ADUVIRE PATACA  
Asesor

## **Dedicatoria**

A Dios,  
por su infinito amor a la vida y la naturaleza.

A la Virgen de Guadalupe,  
por su intercesión ante Cristo

A mis hijos y nietos,  
mi descendencia e inspiración.

A mis padres y hermanos,  
En memoria de su amor y recuerdos.

A Juana Elvira,  
Virtuosa compañera y amiga.

A la familia Vargas Tello,  
por haberme puesto en el camino del bien.

A los mineros del Perú y el mundo,  
Por su abnegada labor en bien la sociedad.

## **Agradecimientos**

El autor Agradece a la Universidad Nacional Mayor de San Marcos y en particular a la Unidad de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, por haber recibido la formación académica y, permitir presentar y sustentar la presente tesis doctoral. Análogamente hace lo propio a los distinguidos maestros de esta Unidad, en especial a los Dres. Osvaldo Aduvire Pacata y Margarita Isabel Pajares Flores, por sus oportunas asesorías. Asimismo, a los Dres. Arístides Sotomayor Cabrera y Humberto Pehovaz, integrantes del Jurado Revisor, por sus acertadas observaciones y sugerencias para la mejorar presentación de esta tesis.

Agradece también a la EP de Ingeniería de Minas de la UNMSM, por las facilidades brindadas para acondicionar un laboratorio de pruebas y un almacén para depositar todos los pernos, materiales, equipos y herramientas utilizados durante la etapa de pruebas del presente trabajo de investigación. Hace lo propio también, a las Escuelas de Ingenierías de Minas, Industrial y Metalúrgica de la UNMSM, por los servicios de laboratorio requeridos por el presente estudio.

Asimismo, agradece a la Cía. Minera Poderosa S.A., Cía. New Concept Mining, Prodac, Aceros Arequipa, Atlas Copco y Castem, por haber facilitado los pernos de roca, equipos y los morteros para instalar las barras helicoidales. Asimismo, a la Cía. Minera Castrovirreyna por permitir y brindar todas las facilidades para realizar pruebas en sus operaciones. A Mujipro por los servicios metal mecánicos antes y después de las pruebas de arranque.

También agradece a sus alumnos de la EAP de Ingeniería de Minas de la UNMSM, en especial a Gian Carlos Rosales, Kevin Zender Poma, Christian Morales Rugel y otros, por su activa y valiosa colaboración durante la etapa de preparación, instalación, pruebas de arranque y ensayos post prueba. También, a todos sus amigos y colegas por su directa o indirecta colaboración en la culminación y presentación de la presente tesis.

## Resumen

El sostenimiento de macizos rocosos en toda excavación es fundamental, para prevenir y evitar los desprendimientos de rocas que causan accidentes y contaminación. Los elementos de sostenimiento de mayor aplicación actualmente, son los pernos de roca, que se instalan perforando taladros de un determinado diámetro y profundidad. No obstante que, el diámetro de los taladros afecta la capacidad de anclaje de los pernos de roca, es un factor poco estudiado; que requiere optimizar para mejorar su capacidad de anclaje y reducir su consumo, a fin de minimizar entre otros, los consumos de combustibles, aceites, agua y aire utilizados durante su proceso de instalación, consecuentemente reducir la contaminación ambiental.

En el presente estudio, se ha establecido una metodología que permite estudiar los pernos de roca en igualdad de condiciones de terreno y parámetros de aplicación; sustituyendo los taladros por tubos de acero y el hastial de pruebas, por una mesa de metal. Mediante pruebas de arranque (pull test), se determinaron sus máximas capacidades de anclaje en función del diámetro de taladros y las longitudes efectivas de anclaje (LEA) y, sus respectivas elongaciones. Asimismo, se analizaron sus acoplamientos en las paredes de los taladros y sus posiciones dentro de los tubos. Establecidos los diámetros y LEAs óptimos, se determinó la reducción del número de pernos por área sostenida, y, conjugando con los estudios realizados sobre la demanda actual de pernos en la minería peruana, tiempos y movimientos, gastos y emisiones, que ocasiona la instalación de pernos, se analizaron los efectos ambientales de la optimización del diámetro de taladros.

Los diámetros óptimos de taladros para la instalación de los pernos estudiados, serían: 38 mm (Hydrabolt), 41mm (Swellwex), 32 mm (barras helicoidales) y 37 mm (Split Sets). Las longitudes efectivas de anclaje ideales, serían: 3 pies (Hydrabolt, Swellex y Barras Helicoidales) y 4 pies (Split Sets). Se demuestra que, el acoplamiento y adherencia de los pernos en las paredes de los tubos (taladros) es parcial; en los pernos inflables se generan franjas de aberturas y en las barras helicoidales se ve afectado por los envoltorios de los cartuchos y porosidad del mortero. Al optimizar los diámetros de los taladros, se reducen los consumos y emisiones, tanto para la instalación manual como mecanizado, por citar algunos ejemplos para cada tipo de instalación: Combustibles en 14,3 % y 13,6 %; consumo de agua en 14 % y 13,4%; la emisión de aceites en 16,7 % y 13,6 % y la emisión del CO<sub>2</sub> en 15,4 % y 13,6 %.

## Abstract

Rock support in any excavation is essential to prevent and avoid rock falls, which cause accidents and pollution. The most common rock support elements currently used are rock bolts, which are installed by drilling holes of a certain diameter and depth. Although, the diameter of holes affects the anchoring capacity of rock bolts, it is a little studied factor; which requires optimization to improve the anchoring capacity of bolts and reduce its consumption in order to minimize, among others, the consumption of fuel, oil, water and air used during the installation process, thereby reducing environmental pollution.

In the present study, a methodology has been established that allows the study of rock bolts on the same ground conditions and application parameters, replacing the holes with steel tubes and the rock wall with a metal table. By means of pull tests, maximum anchoring capacities of rock bolts were determined based on the diameter of holes, bond length and their respective elongations. Likewise, their couplings on the walls of the holes and their positions within the tubes were analyzed. Once the optimum diameters and bond lengths were established, the reduction in the number of rock bolts per supported area was determined and, in conjunction with the studies carried out on the current demand for rock bolts in Peruvian mining in terms of time, movements, expenses and emissions (associated to rock bolt installation), the environmental effects of hole diameter optimization were analyzed.

The optimal hole diameters found for rock bolts installation should be 38 mm (Hydrabolt), 41 mm (Swellex), 32 mm (Threaded Bars) and 37 mm (Split Sets). The ideal bond lengths were 3 feet (Hydrabolt, Swellex and Threaded Bars), and 4 feet (Split Sets). It is shown that the coupling and adhesion of the bolts in the tube walls (holes) is partial; for the inflatable bolts, fringes of openings are generated; and on the Threaded Bars, the wrappings of the cartridges and porosity of the mortar affect it. By optimizing hole diameters, consumption and emissions are reduced, both for manual and mechanized installation, to name a few examples for each type of installation: fuel in 14.3% and 13.6%; water consumption at 14% and 13.4%; oil emissions in 16.7% and 13.6% and, CO<sub>2</sub> emission in 15.4% and 13.6%.

## Tabla de Contenidos

### Contenido

Dedicatoria.....	ii
Agradecimientos .....	iii
<b>Resumen</b> .....	iv
Abstract v	
Tabla de Contenidos .....	vi
Lista de tablas .....	xii
Lista de figuras.....	xv
Lista De Símbolos.....	xxii
Lista de abreviaturas .....	xxiii
Conversión de unidades .....	xxiv
Glosario xxv	
Capítulo 1.....	1
Introducción .....	1
1.1 Planteamiento del Problema .....	6
1.1.1 Situación problemática.....	6
1.1.2 Formulación del problema .....	8
1.2 Justificación de la Investigación .....	8
1.3 Objetivos de la Investigación.....	10
1.3.1 Objetivo general.....	10
1.3.2 Objetivos específicos .....	10
1.4 Hipótesis y Variables .....	11
1.4.1 Hipótesis general.....	11
1.4.2 Hipótesis específicas.....	11
1.5 Identificación y Definición de Variables .....	11
Capítulo 2.....	14
Marco Teórico.....	14
2.1.1 Clasificación del medio ambiente .....	16

2.1.2	Contaminación ambiental .....	19vii
2.1.3	Impacto ambiental.....	20
2.2	Macizos Rocosos .....	22
2.2.1	Definición .....	22
2.2.2	Clasificación .....	22
2.3	Excavaciones en Macizos Rocosos.....	33
2.3.1	Fines de las excavaciones en macizos rocosos .....	34
2.3.2	Métodos de excavación.....	35
2.4	Desprendimiento de Rocas .....	37
2.5	Sostenimiento de Macizos Rocosos.....	39
2.5.1	Sostenimiento con roca .....	41
2.5.2	Sostenimiento con madera .....	42
2.5.3	Sostenimiento con cables.....	44
2.5.4	Sostenimiento con pernos (anclajes, spiling).....	46
2.5.5	Sostenimiento con arcos de acero .....	48
2.5.6	Sostenimiento con concreto .....	50
2.5.7	Sostenimiento con mallas de acero .....	52
2.5.8	sostenimiento con relleno .....	52
2.6	Pernos de Roca.....	54
2.6.1	Principio de funcionamiento de los pernos de roca .....	55
2.6.2	Clasificación de los pernos de roca.....	56
2.6.3	Materiales de acoplamiento para pernos de barras rígidas .....	68
2.6.4	Placas para pernos de roca .....	72
2.6.5	Rendimiento de los pernos de roca (capacidad de anclaje). .....	74
	Capítulo 3.....	85
	Marco Metodológico.....	85
3.1	Construcción y Acondicionamiento del Laboratorio de Pruebas .....	85
3.1.1	Diseño y construcción de mesa para pruebas de arranque de pernos .....	85
3.1.2	Diseño y construcción del pozo y losa para las pruebas.....	86
3.1.3	Diseño y construcción de la mesa para instalar los pernos dentro de los tubos simuladores y otros .....	88
3.2	Equipos, Herramientas y Materiales Utilizados.....	89
3.2.1	Equipos .....	90

3.3	Tipo y Diseño de Investigación .....	102viii
3.3.1	Tipo de investigación.....	102
3.3.2	Diseño de investigación.....	102
3.4	Unidades de Análisis.....	112
3.5	Población de Estudio.....	113
3.6	Tamaño de Muestra.....	113
3.7	Selección de Muestra .....	114
3.8	Técnicas de Recolección de Datos.....	115
3.9	Areas de Pruebas, Laboratorios y Talleres .....	116
3.9.1	Sede de la EP de Ingeniería de Minas.....	116
3.9.2	Planta de la Cía. New Concept Mining.....	116
3.9.3	Crucero 752 de la Mina Reliquias – Castrovirreyna.....	117
3.9.4	Taller metal mecánica MUJIPRO .....	117
3.9.5	Laboratorio de Máquinas y Herramientas de la Facultad de Ingeniería Industrial – UNMSM .....	119
3.9.6	Laboratorios de la EP de Ingeniería Metalúrgica – UNMSM .....	119
3.10	Compilación y Procesamiento de Datos .....	120
3.11	Discusión de Resultados .....	121
3.12	Recursos Humanos.....	122
	Capítulo 4.....	123
	Resultados del Estudio de los Split Sets .....	123
4.1	Capacidad de Anclaje en Función de la LEA .....	124
4.2	Capacidad de Anclaje en Función del Diámetro del Tubo Simulador.....	124
4.3	Elongación del Perno en Función de la Carga Aplicada y Diámetro del Tubo Simulador.....	126
4.4	Contactos y Aberturas en Función del Diámetro del Tubo Simulador.....	127
	Capítulo 5.....	130
	Resultados del Estudio de los Pernos Inflables Hydrabolt .....	130
5.1	Capacidad de Anclaje en Función de la LEA .....	134
5.2	Capacidad de Anclaje en Función del Diámetro del Tubo Simulador.....	135
5.3	Elongación en Función de la Carga Aplicada y Diámetro del Tubo Simulador.....	136
5.4	Contactos y Aberturas en Función del Diámetro del Tubo Simulador.....	136
	Capítulo 6.....	139



Resultados del Estudio de los Pernos Inflables X-Pandabolt (Swellex).....	139ix
6.1 Capacidad Anclaje En Función De La LEA .....	141
6.2 Capacidad de Anclaje en función del Diámetro del Tubo Simulador .....	142
6.3 Elongación en función de la Carga Aplicada y Diámetro del Tubo Simulador.....	143
6.4 Discusión de Contactos y Aberturas en Función del Diámetro del Tubo Simulador	144
Capítulo 7.....	147
Resultados del Estudio de las Barras Helicoidales .....	147
7.1 Resultados del Estudio de Las Barras Helicoidales Instaladas con Cartuchos de Cementicio.....	148
7.1.1 Capacidad de Anclaje en función de la LEA .....	148
7.1.2 Capacidad de Anclaje de las Barras Helicoidales Instaladas con Cartuchos de Cementicio Vs Diámetro del Tubo Simulador .....	149
7.1.3 Elongación en función de la Carga Aplicada y Diámetro del Tubo Simulador.....	150
7.1.4 Propiedades Físicas del Cementicio Fraguado Dentro de los Tubos Simuladores ....	152
7.2 Resultados del Estudio de las Barras Helicoidales Instaladas con Cartuchos de Resina .....	168
7.2.1 Capacidad anclaje en función de la LEA .....	169
7.2.2 Capacidad de anclaje en función del diámetro del tubo simulador .....	170
7.2.3 Elongación en función de la carga aplicada y diámetro del tubo simulador .....	171
7.2.4 Propiedades físicas de la resina fraguada dentro de los tubos simuladores .....	171
7.3 Resultados de las Pruebas con Barras Helicoidales Instaladas con Lechada de Cemento.....	191
7.3.1 Capacidad de anclaje en función de la LEA .....	191
7.3.2 Capacidad de anclaje en función del diámetro del tubo simulador .....	193
7.3.3 Elongación en función de la carga aplicada y diámetro del tubo simulador .....	193
7.3.4 Propiedades físicas de la lechada de cemento fraguado dentro de los tubos simuladores .....	194
Capítulo 8.....	207
Discusión de Resultados de la Optimización de Diámetro de Taladros .....	207
8.1 Discusión de Resultados del Estudio de los Pernos Inflables Hydrabolt y Swellex (X-Pandabolt).....	207
8.1.1 Capacidad den anclaje en función de la longitud efectiva de anclaje.....	207

8.1.2	Capacidad de anclaje de los pernos hydrabolt y x-pandabolt en función del diámetro del tubo simulador .....	x 208
8.1.3	Elongación en función de la carga aplicada y diámetro del tubo simulador .....	210
8.1.4	Aberturas y contactos.....	211
8.2	Discusión de Resultados de la Barras Helicoidales Instaladas con Cartuchos de Cementicio Y Resina y, Lechada de Cemento .....	213
8.2.1	Capacidad anclaje en función de la longitud efectiva de anclaje.....	213
8.2.2	Capacidad anclaje en función del diámetro del tubo simulador .....	218
8.2.3	Discusión de la posición de la barra helicoidal y propiedades del material de acoplamiento fraguado.....	224
8.3	discusión Global de Resultados para Todos los Pernos Estudiados .....	241
8.3.1	Capacidad de anclaje en función de la longitud efectiva de anclaje.....	241
8.3.2	Capacidad de anclaje en función del diámetro del tubo simulador. ....	250
8.3.3	Elongación en función de la carga aplicada.....	259
8.4	Análisis Comparativo de las Capacidades de Anclaje de los Pernos de Roca Estudiados en la Mina Castrovirreyna y en Laboratorio .....	264
8.4.1	Capacidad de anclaje de las barras helicoidales instalados en tubos simuladores o taladros de 36 mm.....	264
8.4.2	Capacidad de anclaje de distintos pernos instalados en tubos simuladores o taladros de 38 mm .....	266
8.4.3	Capacidad de anclaje de distintos tipos de pernos ensayados en el laboratorio y la mina Castrovirreyna.....	267
Capítulo 9.....		270
Discusión de Resultados de los Efectos Ambientales.....		270
9.1	Determinación del Número de Pernos de Roca de Acuerdo a los Diámetros de Taladros Antes y Después de su Optimización .....	271
9.2	Demanda de Pernos en la Minería Subterránea Peruana .....	271
9.3	Análisis de los efectos ambientales cuando los pernos se instalan con equipo manual .....	273
9.3.1	Emisión de aceite al medio ambiente.....	277
9.3.2	Emisión de dióxido de carbono.....	279
9.3.3	Emisión de calor .....	280

9.4	Análisis de los Efectos Ambientales Favorables Cuando los Pernos se Instalan Con xi	
	Equipo Mecanizado .....	280
9.4.1	Emisión de aceite al medio ambiente.....	282
9.4.2	Emisión de dióxido de carbono.....	286
9.4.3	Emisión de calor .....	288
9.5	Discusión de los Efectos Ambientales de la Optimización del Diámetro de Taladros	
	Aplicando Equipo Manual y Mecanizado .....	289
9.5.1	Horas laboradas por mes en la instalación de pernos .....	289
9.5.2	Consumo mensual de combustible en la instalación de pernos .....	290
9.5.3	Consumo de aire comprimido en la instalación de pernos de roca.....	292
9.5.4	Consumo mensual de agua en la instalación de pernos de roca de 2,10 m (7 pies) ..	293
9.5.5	Consumo mensual de aceite hidráulico en la instalación de pernos de roca de 2,10 m (7 pies) .....	294
9.5.6	Requerimiento de aire de ventilación en la instalación de pernos de roca de 2,10 m (7 pies).....	295
9.5.7	Emisión de aceite al medio ambiente en la instalación de pernos de roca de 2,10 m (7 pies).....	297
9.5.8	Emisión mensual de calor al medio ambiente en la instalación de pernos de roca de 2,10 m (7 pies) .....	299
9.5.9	Emisión mensual de dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ) al ambiente en la instalación de pernos de roca de 2,10 m (7 pies) .....	300
	Capítulo 10.....	303
	Conclusiones y Recomendaciones .....	303
10.1	Conclusiones .....	303
10.2	Recomendaciones .....	307
	Referencias.....	309
	ANEXOS .....	312

## Lista de tablas

<i>Tabla1 Operacionalización de Variables.....</i>	<i>12</i>
<i>Tabla 2 Matriz de Consistencia.....</i>	<i>13</i>
<i>Tabla3 Determinación del RMR y Clasificación del Macizo Rocoso.....</i>	<i>27</i>
<i>Tabla4 Selección del Método de Excavación y Sostenimiento a Partir del RMR (Bieniawski, 1989).....</i>	<i>29</i>
<i>Tabla5 Valores de ESR de Acuerdo al Tipo de Excavación.....</i>	<i>32</i>
<i>Tabla6 Especificaciones Técnicas de las Barras Helicoidales.....</i>	<i>59</i>
<i>Tabla7 Valores de la Adherencia Roca/Cemento encontrado en pruebas de campo.....</i>	<i>63</i>
<i>Tabla8 Características Técnicas de los Pernos Autoperforantes de Prodac.....</i>	<i>65</i>
<i>Tabla9 Capacidad de Anclaje de Distintos Tipos de Pernos de Roca en Función de la Longitud Efectiva de Anclaje.....</i>	<i>80</i>
<i>Tabla10 Elongación de Distintos Tipos de Pernos de Roca.....</i>	<i>84</i>
<i>Tabla11 Elongación de los Split Sets Ensayados en Laboratorio con 2 pies de LEA.....</i>	<i>126</i>
<i>Tabla12 Aberturas en los Diferentes Diámetros de Tubos Simuladores.....</i>	<i>127</i>
<i>Tabla13 Area (%) con o sin Contactos en los Split Sets Instalados en Tubos Simuladores.....</i>	<i>128</i>
<i>Tabla14 Calibración del Diámetro del Perno de Roca Hydrabolt.....</i>	<i>132</i>
<i>Tabla15 Capacidad de Anclaje de los Pernos Hydrabolt en Función de la Longitud Efectiva de Anclaje.....</i>	<i>134</i>
<i>Tabla16 Capacidad de Anclaje de los Pernos Hydrabolt en Función del Diámetro del Tubo Simulador.....</i>	<i>136</i>
<i>Tabla17 Areas con o sin Contacto en los Pernos Hydrabolt en Diferentes Diámetros de Tubos Simuladores.....</i>	<i>138</i>
<i>Tabla18 Partes y Dimensiones Promedio de los Pernos X-Pandabolt de 7 pies.....</i>	<i>141</i>
<i>Tabla19 Capacidad de Anclaje de los Pernos X-Pandabolt Instalados en Tubos Simuladores en Función de la Longitud Efectiva de Anclaje.....</i>	<i>142</i>
<i>Tabla20 Capacidad de Anclaje de los Pernos X-Pandabolt para diferentes LEAs y Diámetros de Tubo Simulador.....</i>	<i>143</i>
<i>Tabla21 Resumen de la Elongación de los Pernos X-Pandabolt Vs Carga Aplicada en Diferentes Diámetros para 4 pies de LEA.....</i>	<i>144</i>
<i>Tabla22 Areas con o sin Contacto de los Pernos Swellex (X-Pandabolt).....</i>	<i>145</i>
<i>Tabla23 Capacidad de Anclaje de la Barra Helicoidal Instalada con Cartuchos de Cementicio en Función de la LEA.....</i>	<i>149</i>
<i>Tabla24 Capacidad de Anclaje de las Barras Helicoidales Instaladas con Cartuchos de Cementicio en Función del Diámetro de los Tubos Simuladores.....</i>	<i>150</i>
<i>Tabla25 Dureza HL del Cementicio.....</i>	<i>163</i>
<i>Tabla26 Densidad del Cementicio Fraguado en Función del Diámetro del Tubo Simulador.....</i>	<i>164</i>
<i>Tabla27 Absorción de Agua por el Cementicio Fraguado Vs Diámetro de Tubo Simulador.....</i>	<i>165</i>
<i>Tabla28 Capacidad de Anclaje de las Barras Helicoidales Instaladas con Cartuchos de Resina en Función de la LEA.....</i>	<i>169</i>
<i>Tabla29 Capacidad de Anclaje de las Barras Helicoidales con Cartuchos de Resina en Función del Diámetro del Tubo Simulador.....</i>	<i>170</i>
<i>Tabla30 Dureza HL de la Resina Fraguada.....</i>	<i>186</i>
<i>Tabla31 Densidad de la Resina Fraguada en Función de Diámetro del Tubo Simulador.....</i>	<i>188</i>
<i>Tabla32 Absorción de Agua por la Resina Fraguada Vs Diámetro del Tubo Simulador.....</i>	<i>188</i>
<i>Tabla33 Capacidad de Anclaje de las Barras Helicoidales Instaladas con Lechada de Cemento Vs LEA.....</i>	<i>192</i>
<i>Tabla34 193</i>	
<i>Tabla35 Dureza HL de la Lechada de Cemento Fraguada.....</i>	<i>203</i>
<i>Tabla36 Densidad de la Lechada de Cemento fraguada Vs Diámetro de Tubo Simulador.....</i>	<i>204</i>
<i>Tabla37 Absorción de Agua por la Lechada de Cemento Vs Diámetro de Tubo Simulador.....</i>	<i>205</i>
<i>Tabla38 Capacidad de Anclaje de los Pernos de Hydrabolt y Swellex (X-Pandabolt) en Función de la LEA en Diferentes Diámetros de Tubos Simuladores.....</i>	<i>208</i>
<i>Tabla39 Capacidades de Anclaje Promedio de los Pernos Hydrabolt y Swellex en Función del Diámetro de los Tubos Simuladores.....</i>	<i>209</i>
<i>Tabla40 Elongación Vs Carga Aplicada para 4 pies de LEA de los Pernos Hydrabolt y Swellex.....</i>	<i>210</i>
<i>Tabla41 Número de Aberturas Generados y sus Dimensiones Promedio de Acuerdo al Diámetro del Tubo Simulador en los pernos Hydrabolt y Swellex.....</i>	<i>211</i>
<i>Tabla42 Áreas con o sin Contacto Debido a las Aberturas y Pliegues de los Pernos Hydrabolt y Swellex.....</i>	<i>212</i>
<i>Tabla43 Capacidad de Anclaje de las Barras Helicoidales Instaladas con Cartuchos de Cementicio, Resina y Lechada de Cemento en Tubos Simuladores de 32,5 mm.....</i>	<i>213</i>

Tabla44 Capacidad de Anclaje de las Barras Helicoidales Instaladas con Cartuchos de Cementicio, Resina y Lechada de Cemento en Tubos Simuladores de 36,3 mm (36 mm).....	xiii 214
Tabla45 Capacidad de Anclaje de las Barras Helicoidales Instaladas con Cartuchos de Cementicio, Resina y Lechada de Cemento en Tubos Simuladores de 38,3 mm Vs LEA.....	215
Tabla46 Capacidad de Anclaje de las Barras Helicoidales Instaladas con Cartuchos de Cementicio, Resina y Lechada de Cemento en Tubos Simuladores de 42 mm.....	216
Tabla47 Capacidad de Anclaje Comparativo delas Barras Helicoidales en Diferentes Diámetros y Materiales de Acoplamiento en Función de la LEA .....	217
Tabla48 Capacidad de Anclaje de las Barras Helicoidales en Función del Diámetro del Tubo Simulador para pie de LEA y Diferentes Materiales de Acoplamiento .....	218
Tabla49 Capacidad de Anclaje de las Barras Helicoidales en Función del Diámetro del Tubo Simulador para 2 pies de LEA y Diferentes Materiales de Acoplamiento .....	220
Tabla50 Capacidad de Anclaje de las Barras Helicoidales en Función del Diámetro de Tubo Simulador para 3 pies de LEA y Diferentes Materiales de Acoplamiento .....	221
Tabla51 Capacidad de Anclaje de las Barras Helicoidales en Función del Diámetro del Tubo Simulador para 4 pies de LEA y Diferentes Materiales de Acoplamiento .....	222
Tabla52 Capacidad de Anclaje de las Barras Helicoidales en Función del Diámetro del Tubo Simulador para Diferentes Materiales de Acoplamiento .....	223
Tabla53 Análisis de la Posición de la Barra Helicoidal en Cada Tipo de Material de Acoplamiento en Diferentes Diámetros y Segmentos.....	226
Tabla54 Número de poros en el Material de Acoplamiento de las Barras Helicoidales Observados en el Corte de los Segmentos de Muestras.....	229
Tabla55 Areas con o sin Contacto en los Pernos Hydrabolt y Swellex (X-Pandabolt) en Diferentes Diámetros de Tubo Simulador .....	230
Tabla56 Dimensiones de las Aberturas en los Split Sets instalados en Diferentes Tubos Simuladores.....	232
Tabla57 Areas con o sin Contacto de los Split Sets con las Paredes del Tubo Simulador.....	232
Tabla58 Calidad de Acoplamiento de los Morteros de las Barras Helicoidales en Diferentes Diámetros de los Tubos Simuladores .....	233
Tabla59 Presencia de Envoltorios Plásticos de los cartuchos de Cementicio y Resina, Observados en Diferentes Segmentos de Muestras y Diámetros.....	235
Tabla60 Rugosidad de los Morteros Fraguados Antes y Después de la Prueba de Absorción de Agua.....	237
Tabla61 Dureza Promedio de los Morteros Fraguados de las Barras Helicoidales .....	238
Tabla62 Densidades Promedio de los Morteros Fraguados de las Barras Helicoidales.....	239
Tabla63 Porcentaje de Agua Absorbida por los Morteros Fraguados de las Barras Helicoidales .....	240
Tabla64 Capacidad de Anclaje de los Pernos Instalados en Tubos Simuladores de 32,5 mm en Función de la LEA.....	241
Tabla65 Capacidad de Anclaje de las Barras Helicoidales en Tubos Simuladores de 36,3 mm en Función de la LEA.....	242
Tabla66 Capacidad de Anclaje de los Pernos de Roca Instalados en Tubos Simuladores de 38,3 mm de Diámetro Vs LEA.....	243
Tabla67 Capacidad de Anclaje de los Pernos Inflables en tubo Simulador de 40,96 mm Vs LEA .....	244
Tabla68 Capacidad de Anclaje de las Barras Helicoidales en Tubo Simulador de 42 mm Vs LEA y Diferentes Materiales de Acoplamiento.....	245
Tabla69 Capacidad de Anclaje de los Pernos de Roca en Función de la LEA en Diferentes Diámetros de Tubo Simulador .....	248
Tabla70 Capacidad de Anclaje de los Pernos de Roca en Función del Diámetro del Tubo Simulador para 1 pie de LEA .....	250
Tabla71 Capacidad de Anclaje de los Pernos de Roca en Función del Diámetro de Tubo Simulador para 2 pies de LEA .....	252
Tabla72 Capacidad de Anclaje de los Pernos de Roca en Función del Diámetro del Tubo Simulador para 3 pies de LEA .....	253
Tabla73 Capacidad de Anclaje de los Pernos en Función del Diámetro de Tubos Simuladores para 4 pies de LEA.....	254
Tabla74 Capacidad de Anclaje de los Pernos de Roca en Función del Diámetro del Tubo Simulador y Diferentes LEAs.....	257
Tabla75 Capacidad de Anclaje Comparativa de las Barras Helicoidales Instaladas en Taladros (mina) y Tubos Simuladores (laboratorio) de 36 mm de Diámetro Vs LEA.....	265
Tabla76 Capacidad de Anclaje Comparativa de Pernos de Roca Instalados en Taladros (mina) y Tubos Simuladores (laboratorio) de 38 mm de Diámetro Vs LEA.....	267

<i>Tabla77 Capacidad de Anclaje de Distintos Tipos de Pernos de Roca en Diámetros de 36 y 38 mm Tanto en xiv el Laboratorio como en la Mina.....</i>	<i>269</i>
<i>Tabla78 Determinación de la Reducción Porcentual del Número de Pernos en Sostenimiento al Optimizar los Diámetros de los Taladros y en Función de las Longitudes Efectivas de Anclaje Optimas .....</i>	<i>272</i>
<i>Tabla79 Demanda Mensual de Pernos de Roca en la Minería Subterránea Peruana.....</i>	<i>273</i>
<i>Tabla80 Especificaciones Técnicas de Distintas Marcas de Perforadoras Jackleg Aplicadas en la Minería Peruana .....</i>	<i>275</i>
<i>Tabla81 Compresores de Distintas Marcas Mostrando sus Principales Especificaciones Técnicas, Entre Ellas la Capacidad Volumétrica y Potencia de Motor .....</i>	<i>276</i>
<i>Tabla82 Análisis de Demandas y Efectos Ambientales en la Instalación de Pernos de Roca de 7 pies (2,10 m) con Equipo Manual por Mes en la Minería Subterránea Peruana .....</i>	<i>278</i>
<i>Tabla83 Características Técnicas de Empernadoras de Roca Marca Epiroc (Atlas Copco) y Sandvik .....</i>	<i>284</i>
<i>Tabla84 Análisis de Demanda y Efectos Ambientales en la Instalación de Pernos de roca de 7 pies (2,10 m) con Equipo Mecanizado por mes en la Minería Peruana .....</i>	<i>285</i>
<i>Tabla85 Análisis de Consumo Unitario de Combustible paara Algunos Equipos de Aplicación Subterránea en Función de su Potencia (gj/HP-h).....</i>	<i>287</i>
<i>Tabla86 Eficiencia de los Motores Eléctricos en Función de su Potencia.....</i>	<i>288</i>
<i>Tabla87 Requerimiento de Aire en la Ventilación Subterránea en Función de la Altitud Sobre el Nivel del Mar .....</i>	<i>296</i>

## Lista de figuras

Figura 1. Llanganuco como Ejemplo de Ambiente Físico.....	17
Figura 2. La Flora y Fauna en la Selva de Tarapoto.....	17
Figura 3. Excavaciones subterráneas como centro laboral. (a) Tajo minero. (b) Aplicación de concreto lanzado (shotcrete) en un túnel. ....	18
Figura 4. Ciudad de Cusco como Ejemplo de Ambiente Socio - Económico .....	19
Figura 5. Diagrama para determinar las categorías de sostenimiento basado en el índice $Q$ según Barton y Broch (1993). Según Palmström y otros, las limitaciones de este diagrama se muestran fuera de rectángulo en blanco.....	33
Figura 6. Espacios Abiertos en Macizos Rocosos. (a) Túnel de Aducción en Yuncan (Pasco). (b) Galería Principal en la Mina Reliquias (Huancavelica). ....	35
Figura 7. Aprovechamiento del Material Arrancado. a) Mina de Oro a Tajo Abierto en Nicaragua. (b) Mina de Carbón Subterránea en La Libertad – Perú. ....	35
Figura 8. Métodos de Excavación Aplicados en el Mismo Túnel y Tipo de Roca en Yuncan II. (a) Método Convencional de Perforación y Voladura con Jumbo. (b) Con Minador Continuo (TBM). ....	37
Figura 9. Desprendimientos de rocas en taludes de carreteras sin sostenimiento en el Perú. (a) Carretera Central (Huarochiri). (b) Carretera Lima – Canta (Canta).....	38
Figura 10. Desprendimiento de rocas en ambientes subterráneos. (a) En la mina San Ignacio de Morococha (Junín). (b) En la mina Orcopampa (Arequipa) .....	39
Figura 11. Tiempo de Autosuporte de la Roca en las Excavaciones Subterráneas (Bieniawski, 1989).....	40
Figura 12. Desprendimientos de Roca. (a) Por Falta de Mantenimiento del Sostenimiento con Madera. (b) Desprendimiento por Falta de Sostenimiento. ....	41
Figura 13. Sostenimiento con roca. (a) Galería. (b) Gaviones en andenería .....	42
Figura 14. Sostenimiento con Madera. (a) Cuadro Cono Mostrando sus Elementos en una Mina de Carbón. b) Cuadros Cono en la Ventana de Acceso a un Túnel. ....	43
Figura 15. Sostenimiento con madera en minas de carbón. (a) Cuadros cojos rendidos antes de su reemplazo. (b) Puntales en un tajeo. ....	44
Figura 16. Cables de Acero para el Sostenimiento de Macizos Rocosos. (a) Muestra de Cable para Anclaje. (b) Cables Instalados. (c) Cables Sujetando Mallas de Acero. ....	45
Figura 17. Sostenimiento con Pernos de Roca. (a) Barra Helicoidal en el Talud de un Tamo de la Carretera Tarapoto – Yurimaguas. (b) Barra Helicoidal en la Mina Condestable en Terreno Fracturado. ....	47
Figura 18. Recreación de la Instalación de Spiles con Pernos Autoperforantes. ....	48
Figura 19. Comportamiento del Acero, Esfuerzo Vs Deformación .....	49
Figura 20. Sostenimiento con arcos de acero. (a) En galería minera. (b) Túnel de uso civil. ....	50
Figura 21. Sostenimiento de Túneles con Shotcrete. (a) Aplicación Durante la Excavación con TBM. (b) Túnel excavado con perforación y voladura terminado. ....	51
Figura 22. Sostenimiento de Túneles con Dovelas. (a) Dovelas en la Planta de fabricación. (b) Anillos de Dovelas Instaladas.....	52
Figura 23. Sostenimiento de Macizos Rosos con Mallas de Acero y Pernos. (a) Malla Electrosoldada. (b) Malla Trenzada. ....	53
Figura 24. Esquema del Método de Explotación por “Corte y Relleno Ascendente”, con Relleno Detritico.....	54
Figura 25. Relleno a Partir del Relave. (a) Tajeo Rellenado con Relleno Hidráulico. (b) Relleno en pasta.....	54
Figura 26. Pernos de Barra con Ranura y Cuña.....	57
Figura 27. Barra con Concha de Expansión.....	58
Figura 28. Barra Helicoidal. (a) Cola. (b) Cabeza.....	59
Figura 29. Barra Helicoidal de $\Phi$ 22 mm y 7 Pies de Longitud.....	60
Figura 30. Pernos Autoperforantes SINOROCK. (a) Mostrando sus Componentes. (b) Mostrando el Paso de Rosca Continua y los Agujeros de los Elementos de Corte. ....	64
Figura 31. Pila de Tubos Rolados Durante el Proceso de Fabricación de los Pernos Swellex.....	66
Figura 32. Pernos Inflables. Parte Superior: X-Pandabolt de 7'. Centro: Hydrabolt de 6'. Inferior: Swellex de 5', Mostrando su Cabeza y Cola en Forma de Manguito.....	66
Figura 33. Agujeros para inyección de agua en pernos inflables. (a) En los Swellex. (b) Hydrabolt (izquierdo) y X-Pandabolt (derecha).....	67
Figura 34. Perno inflable seccionado. (a) Antes y después de inflado en tubo de 38 mm de diámetro. (b) Antes y después de inflado al aire libre.....	67

Figura 35. Split Set Mostrando sus Partes .....	68xvi
Figura 36. Split Set Seccionado. A la Izquierda, se Muestra el Ancho de la Ranura Original y a la Derecha, Introducido Dentro de un Tubo de 38 mm de Diámetro se Observa la Reducción del Ancho de la Ranura .....	68
Figura 37. Cartuchos de Resina Lokset. (a) Cajas Conteniendo los Cartuchos de Resina. (b) Cartucho Seccionado Mostrando sus Componentes Separados por un Diafragma. ....	69
Figura 38. Cemento Portland Tipo I de Cemento Andino (Perú).....	71
Figura 39. Cartuchos de Cementicio Rem-Bolt. (a) Presentación de los Cartuchos de Cementicio. (b) Cartuchos de Cementicio Antes de su Remojo en Agua .....	72
Figura 40. Barra Helicoidal Mostrando su Planchuela y Tuerca. (a) Antes de su Instalación. (b) Instalado con Malla de Acero Electro soldada .....	73
Figura 41. Distintos Tipos de Planchuelas para Pernos de Roca .....	74
Figura 42. Equipo de Arranque para Medir la Capacidad de Anclaje de los Pernos de Roca .....	75
Figura 43. Esparrago Diseñado para las Pruebas de Arranque de Barras Helicoidales. (a) Vista de Planta, al Lado Izquierdo se Observa la Rosca para Enroscar el Perno Mariposa. (b) Vista Frontal, se Observa los Filetes Internos donde Encajan las de las Barras Helicoidales .....	76
Figura 44. Pruebas de Arranque de Barras Helicoidales. (a) En el Laboratorio. (b) en el Terreno.....	77
Figura 45. Herramientas utilizadas para las pruebas de Barras Helicoidales. (a) Adaptador para su instalación con perforadora jackleg. (b) Jalador para las pruebas de arranque (Aceros Arequipa).....	78
Figura 46. Equipo de arranque utilizado en Castrovirreyna. (a) En la planta de New Concept Mining, mostrando todos sus componentes. (b) Durante las pruebas en la Cía. Condestable .....	80
Figura 47. Capacidad de Anclaje de Distintos Pernos en Función de la Longitud Efectiva de Anclaje. ....	81
Figura 48. Elongación de los pernos estudiados en Castrovirreyna en función de la carga aplicada para una longitud efectiva de anclaje de 4 pies .....	82
Figura 49. Work Index de los Pernos Swellex Según Atlas Copco.....	84
Figura 50. Mesa para Determinar la Capacidad de Anclaje de los Pernos de Roca. (a) Diseño en AutoCAD. (b) Construido de Fierro y Acero, Listo para las Pruebas de Arranque.....	87
Figura 51. Construcción de Pozo y Losa de Concreto para Facilitar las Pruebas de Pernos de Roca. (a) Instalación del Tubo PVC de 4" Dentro del Pozo. (b) Losa Coronando el Pozo con Tapa de Registro.....	87
Figura 52. Equipo de Arranque Montado sobre la Mesa para Determinar la Capacidad de Anclaje de Pernos Posicionado sobre la Losa con Parte del Perno Dentro del Pozo. ....	88
Figura 53. Mesa para la Preparación e Instalación de Pernos de Roca Dentro de los Tubos Simuladores .....	89
Figura 54. (a) Martillo Eléctrico Bosch GSH 11 E. (b) Tronzadora DEWALT de 14" D28700 .....	91
Figura 55. Amoladora angular Bosch GWS 13-125 CIE .....	91
Figura 56. Rotomartillo BOSCH de Sodimac. (a) Modelo GBH 5-40 DCE. (b) Modelo GBH 11 DE .....	92
Figura 57. Taladro Eléctrico Skil 6060.....	93
Figura 58. Ejemplos de Equipos Utilizados en el Taller Metal Mecánico. (a) Sierra Eléctrica. (b) Torno Electrónico.....	93
Figura 59. Equipos para Medir la Rugosidad y Dureza. (a) Rugosímetro TR 220. (b) Durómetro TH 160.....	94
Figura 60. Equipo Charpy en la Facultad de Ing. Industrial.....	95
Figura 61. Balanzas Analíticas de la EP Ing. Metalúrgica Z Ohaus. (a) Manual TJ 261. (b) Digital AR 3130..	96
Figura 62. Horno Mufla de 12 KW en la Facultad de Ingeniería Industrial-UNMSM .....	97
Figura 63. Equipo de Arranque de Minova que Tiene una Capacidad de 30 ton .....	98
Figura 64. Adaptador para la instalación de las barras helicoidales. (a) Vista de perfil. (b) Vista de frente. ....	98
Figura 65. Adaptador para instalar Split Sets. (a) Parte delantera. (b) Parte posterior .....	99
Figura 66. Adaptador (espárrago) para hacer la prueba de arranque de las barras helicoidales. (a) Vista de perfil. (b) Vista frontal .....	99
Figura 67. Torres para el Montaje del Cilindro Hidráulico. (a) Torre Universal con Asiento Regulable. (b) Torre Universal con Asiento Fijo. (c) Torre Cilíndrico con Asiento Regulable.....	100
Figura 68. Mordazas para Enganchar la Cabeza de los Pernos Durante las Pruebas de Arranque. (a) Mordaza para el Arranque de Barras Helicoidales. (b) Mordaza para Split Sets. (c) Mordaza para Hydrabolt y Swellex (X-Pandabolt) .....	100
Figura 69. Vernier Digital Truper.....	101
Figura 70. Disco de Devaste Bosch de 14".....	102
Figura 71. Tubos Simuladores para Distintas Longitudes Efectivas de Anclaje.....	103
Figura 72. Preparación de los Pernos para las Pruebas. (a) Preparación de los Split Sets y Barras Helicoidales. (b) Preparación de los Pernos Inflables Hydrabolt y Swellex (X-Pandabolt). ....	104
Figura 73. Codificación de las muestras de pernos de roca. (a) Marcado reiterativo de los códigos. (b) Parte de los tubos simuladores codificados en la sede de la EP Ing. de Minas - UNMSM .....	105



Figura 74. Instalación de los pernos inflables X-Pandabolt (Swellex) .....	106xvii
Figura 75. Instalación de los Split Sets .....	107
Figura 76. Instalación de las Barras Helicoidales.....	108
Figura 77. Pruebas de arranque (pull test). (a) En la Mina reliquias de Castrovirreyna. (b) En el laboratorio acondicionado en la sede de la EP de Ingeniería de Minas - UNMSM.....	109
Figura 78. Acoplamiento de Pernos Dentro de los Tubos Simuladores. (a) Acoplamiento de los Split Sets. (b) Acoplamiento de los Pernos Inflables Hydrabolt y Swellex (X-Pandabolt).....	110
Figura 79. Muestras Seccionadas de Barras Helicoidales. (a) Probetas de Barras Helicoidales Instaladas con Distintos Morteros. (b) Probetas de Barras Helicoidales Instaladas con Cartuchos de Resina. ...	111
Figura 80. Probetas de Barras Helicoidales. (a) Instaladas con Cartuchos de Cementicio. (b) Instaladas con Lechada de Cemento.....	111
Figura 81. Sede de la EP Ingeniería de Minas. (a) Presentación de Pernos Inflables Antes del Inicio de las Pruebas. (b) Construcción del Pozo de Ensayos Coronado con una Loza de Concreto. ....	116
Figura 82. Planta de la Cía. New Concept Mining. (a) Preparación de los Pernos Inflables Hydrabolt y X-Pandabolt. (b) Proceso de Instalación de Dichos Pernos. ....	117
Figura 83. Mina Reliquias de la Cía. Minera Castrovirreyna. (a) Portada del Nivel 642. (b) Crucero 752 del Nivel 642 .....	118
Figura 84. Taller Metal Mecánico MUJIPRO. (a) Preparación de Tubos Simuladores y de Estrangulamiento y, Arandelas. (b) Mesa para Determinar la Capacidad de Anclaje de los Pernos de roca y Pernos Inflables con sus Arandelas de Tope Soldadas. ....	119
Figura 85. Laboratorio de Máquinas y Herramientas de la Facultad de Ingeniería Industrial. (a) Dr. José López coordinando con sus asistentes para la ejecución las pruebas. (b) Preparación de las probetas para los ensayos.....	120
Figura 86. Laboratorios de la EP de Ingeniería Metalúrgica - UNMSM. (a) Determinación de la densidad en el laboratorio de Bio metalurgia. (b) Ensayo de absorción de agua en el laboratorio de piro metalurgia. ....	120
Figura 87. Preparación de Split sets. a) Proceso de Corte. b) Conificado de la cola .....	124
Figura 88. Capacidad de Anclaje de los Split Sets en Función de la Longitud Efectiva de Anclaje (LEA) .....	125
Figura 89. Capacidad de Anclaje de los Split Sets en Función del Diámetro de Tubo Simulador. ....	125
Figura 90. Elongación de los Split Sets Instalados en Diferentes Tubos Simuladores .....	126
Figura 91. Contactos y Aberturas de los Split Sets en Diferentes Tubos Simuladores. ....	127
Figura 92. Áreas con o sin Contacto en los Split Sets en Función del Diámetro del Tubo Simulador .....	128
Figura 93. Ancho de la Ranura del Split Set en Función del Diámetro del Tubo Simulador.....	129
Figura 94. Perno Hydrabolt Completo Mostrando sus Partes.....	130
Figura 95. Extremos del Perno Hydrabolt. (a) Buje de la Cola. (b) Buje de la Cabeza .....	131
Figura 96. Hydrabolt Seccionado Antes y Después de su Inflado al Aire Libre .....	132
Figura 97. Hydrabolt Antes de su Inflado Incluido en Otro Completamente Inflado al aire libre .....	133
Figura 98. Curvamiento Longitudinal de los Pernos Hydrabolt Inflados al Aire Libre. ....	134
Figura 99. Capacidad de Anclaje de los Pernos Hydrabolt en Función de la LEA .....	135
Figura 100. Capacidad de Anclaje de los Pernos Hydrabolt en Función del Diámetro del Tubo Simulador ...	136
Figura 101. Elongación de los Hydrabolt para 4 pies de LEA en Diferentes Tubos Simuladores.....	137
Figura 102. Acoplamiento de los Hydrabolt en Diferentes Diámetros de Tubos Simuladores. ....	137
Figura 103. Areas con o sin Contacto de los Pernos Hydrabolt en Diferentes Tubos Simuladores. ....	138
Figura 104. Perno Inflable Swellex (X-Pandabolt) Visto de su Cabeza Hacia su Cola.....	139
Figura 105. Válvula del Perno X-Pandabolt Visto de Perfil y Frente. (b) Código de Colores de las agujas según la Longitud de los Pernos Hydrabolt y X-Pandabolt.....	140
Figura 106. Capacidad de anclaje de los pernos X-Pandabolt para diferentes diámetros Vs LEA.....	142
Figura 107. Capacidad de anclaje de los pernos X-Pandabolt para diferentes LEAs Vs diámetro de tubo simulador .....	143
Figura 108. Elongación de los X-Pandabolt para 4 pies de LEA .....	144
Figura 109. Perfiles de los pernos Swellex (X-Pandabolt) de acuerdo al diámetro del tubo simulador .....	145
Figura 110. Areas con o sin Contacto de los Swellex (X-Pandabolt) Vs Diámetro del Tubo Simulador.....	146
Figura 111. Barras helicoidales.....	147
Figura 112. Cartuchos de cementicio en su caja y bolsa original .....	149
Figura 113. Capacidad de Anclaje de las Barras Helicoidales Instaladas con Cartuchos de Cementicio en Función de la LEA .....	150
Figura 114. Capacidad de Anclaje de las Barras Helicoidales Instaladas con Cartuchos de Cementicio en Función del Diámetro de los Tubos Simuladores. ....	151
Figura 115. Elongación de las Barras Helicoidales Instaladas con Cartucho de Cementicio .....	151

<i>Figura 116. Porosidad del Cementicio Fraguado en Distintos Diámetros de Tubos Simuladores en Corte Transversal. (a) Diámetro 32,5 mm. (b) Diámetro 36,3 mm. (c) Diámetro 38,3 mm. (d) Diámetro 42 mm. ....</i>	<i>xviii</i> <i>154</i>
<i>Figura 117. Adherencia y Acoplamiento del Cementicio en Tubo Simulador de 32,5 mm. (a) En la Barra Helicoidal. (b) en la Pared del Tubo Simulador. ....</i>	<i>155</i>
<i>Figura 118. Adherencia y Acoplamiento del Cementicio en Tubo Simulador de 36,3 mm. (a) En la Barra Helicoidal. (b) en la Pared del Tubo Simulador. ....</i>	<i>155</i>
<i>Figura 119. Adherencia y Acoplamiento del Cementicio en tubo Simulador de 38,3 mm. (a) En la Barra Helicoidal. (b) en la Pared del Tubo Simulador. ....</i>	<i>155</i>
<i>Figura 120. Adherencia y Acoplamiento del Cementicio en Tubo Simulador de 42 mm. (a) En la Barra Helicoidal. (b) En la Pared del Tubo Simulador ....</i>	<i>156</i>
<i>Figura 121. Acoplamiento del Cementicio en la Barra Helicoidal y la Pared del Tubo Simulador, Visto en Corte Longitudinal de Muestra. ....</i>	<i>157</i>
<i>Figura 122. Factores que afectan la Adherencia. (a) Oxido en la Barra Helicoidal. (b) Porosidad en el Cementicio. ....</i>	<i>157</i>
<i>Figura 123. Ensayo Charpy para Medir la Adherencia. (a) Equipo Charpy Impactando a la Probeta de la Barra Helicoidal Instalada con Cementicio en Tubo de 42 mm. (b) Goniómetro del Péndulo Charpy. ....</i>	<i>158</i>
<i>Figura 124: Estado del cementicio por la acción del péndulo Charpy. (a) Caída de 50°. (b) Caída de 60°. c) Caída de 70° ....</i>	<i>158</i>
<i>Figura 125. Acumulación del Envoltorio Plástico en el Fondo de los Tubos Simuladores. (a) Tubo Simulador de 38,3 mm. (b) Tubo Simulador de 42 mm. ....</i>	<i>159</i>
<i>Figura 126. Envoltorio de Plástico Cubriendo a la Barra Helicoidal. (a) En Tubo Simulador de 32,5 mm. (b) En tubo Simulador de 36 mm. ....</i>	<i>159</i>
<i>Figura 127. Envoltorio plástico en la pared interior del tubo simulador. (a) en tubo simulador de 33 mm. (b) En tubo simulador de 42 mm. ....</i>	<i>160</i>
<i>Figura 128. Presencia del Envoltorio Plástico de los Cartuchos de Cementicio. (a) Diámetro 33 mm. (b) Diámetro 36 mm. (c) Diámetro 38 mm. (d) Diámetro 40 mm. ....</i>	<i>161</i>
<i>Figura 129. Medición de la Rugosidad del Cementicio. (a) Rugosímetro TR 220. (b) Estudiantes de la FII en Proceso de Medición. ....</i>	<i>162</i>
<i>Figura 130. Ensayos de Dureza en el Laboratorio de la FII. (a) Durómetro Digital Time Hardness Tester TH 160. (b) Patrón de Dureza de una Cara Demeq. ....</i>	<i>163</i>
<i>Figura 131. Medición de la Densidad del Cementicio Fraguado. (a) Pesaje de la Probeta Vacía y las Muestras. (b) Pesaje de la Probeta Conteniendo la Muestra y Enrasado con Agua a 110 ml. ....</i>	<i>164</i>
<i>Figura 132. Proceso para Determinar la Capacidad de Absorción de Agua del Cementicio. (a) Pesaje la Probeta en la Balanza Analítica. (b) Probetas Pesadas en Seco. (c) Probetas Pesadas Después del Remojo y Secado. ....</i>	<i>165</i>
<i>Figura 133. Muestras de cementicio liberados del tubo y la barra helicoidal, antes de su tratamiento térmico ....</i>	<i>166</i>
<i>Figura 134. Estado de las muestras de cementicio después de 7 horas y 38 minutos de tratamiento térmico a 200 °C. ....</i>	<i>167</i>
<i>Figura 135. Estado de las muestras de cementicio, luego del tratamiento térmico a 400 °C ....</i>	<i>167</i>
<i>Figura 136. Estado del Cementicio Instalado en Tubo Simulador de 36 mm Antes y Después del Ensayo Térmico. (a) Muestra Antes de Choque Térmico. (b) Después del Choque Térmico de 200 °C. (c) Después del Choque térmico de 400 °C. ....</i>	<i>168</i>
<i>Figura 137. Cartuchos de Resina Lockset de Minova. (a) Presentación en Cajas Mostrando Etiqueta (verde). (b) Mostrando sus Componentes de Resina y Catalizador Separados por un Diafragma. ....</i>	<i>169</i>
<i>Figura 138. Capacidad de Anclaje de las Barras Helicoidales Instaladas con Cartuchos de Resina en Función de la LEA ....</i>	<i>170</i>
<i>Figura 139. Capacidad de Anclaje de las Barras Helicoidales Instaladas con Cartuchos de Resina en Función del Diámetro de Tubo Simulador. ....</i>	<i>171</i>
<i>Figura 140. Elongación de la Barra Helicoidal Instalada con Cartuchos de Resina ....</i>	<i>172</i>
<i>Figura 141. Muestras Marcadas para el Seccionamiento de las Barras Helicoidales Instaladas con Cartuchos de Resina. ....</i>	<i>173</i>
<i>Figura 142. Seccionamiento de Muestras de Barras Helicoidales Instaladas con Cartuchos de Resina. (a) Seccionamiento Transversal. (b) Seccionamiento Longitudinal. ....</i>	<i>173</i>
<i>Figura 143. Modelo de Preparación de Probetas de Barras Helicoidales Instaladas con Cartuchos de Resina en Tubo Simulador de 36 mm. (a) Proceso de Corte. (b) Probeta Lista para las Pruebas. ....</i>	<i>174</i>
<i>Figura 144. Probetas de Barras Helicoidales Instaladas con Cartuchos de Resina en Diferentes Tubos Simuladores ....</i>	<i>174</i>
<i>Figura 145. Posición de las Barras Helicoidales Instaladas con Cartuchos de Resina. ....</i>	<i>175</i>

<i>Figura 146. Porosidad de la Resina Fraguado en Distintos Diámetros de Tubos Simuladores en Corte Transversal. (a) Diámetro 32,5 mm. (b) Diámetro 36,3 mm. (c) Diámetro 38,3 mm. (d) Diámetro 42 mm. ....</i>	<i>xix</i>
<i>Figura 147. Acoplamiento y Adherencia de la Resina en Tubo Simulador de 32,5 mm. (a) En la Barra Helicoidal. (b) En la Pared del Tubo Simulador. ....</i>	<i>177</i>
<i>Figura 148. Acoplamiento y Adherencia de la Resina en Tubo Simulador de 36,3 mm. (a) En la Barra Helicoidal. (b) en la Pared del Tubo Simulador. ....</i>	<i>178</i>
<i>Figura 149. Acoplamiento y Adherencia de la Resina en Tubo Simulador de 38,3 mm. (a) En la Barra Helicoidal. (b) En la Pared del Tubo Simulador. ....</i>	<i>178</i>
<i>Figura 150. Acoplamiento y Adherencia de la Resina en Tubo Simulador de 42 mm. (a) En la Barra Helicoidal. (b) En la Pared del Tubo Simulador. ....</i>	<i>179</i>
<i>Figura 151. Presencia de envoltorio plástico y óxido evitan la adherencia de la resina. ....</i>	<i>179</i>
<i>Figura 152. Péndulo Charpy Impactando a la Probeta. ....</i>	<i>180</i>
<i>Figura 153. Estado de la Resina en Tubo Simulador de 36,3 mm Después de las Pruebas de Charpy. (a) Angulo de Caída de 50°. (b) Angulo de Caída de 60°. (c) Angulo de Caída de 70°. ....</i>	<i>181</i>
<i>Figura 154. Estados de la Resina por la Acción del Péndulo Charpy. (a) Antes del Ensayo. (b) Caída de 50°. (c) Caída de 60°. (d) Caída de 70°. ....</i>	<i>182</i>
<i>Figura 155. Acumulación de los Envoltorios Plásticos de los Cartuchos de Resina en el Fondo de los Tubos Simuladores. (a) Tubo de 32,5 mm. (b) Tubo de 42 mm. ....</i>	<i>183</i>
<i>Figura 156. Envoltorio Plástico del Cartucho de Resina, Envolviendo a la Barra Helicoidal Evitando su Acoplamiento y Adherencia. ....</i>	<i>183</i>
<i>Figura 157. Envoltorio Plástico del Cartucho de Resina Evitando su Acoplamiento y Adherencia en la Pared Interior del Tubo Simulador. ....</i>	<i>184</i>
<i>Figura 158. Presencia del Envoltorio Plástico de los Cartuchos de Resina en Sección Transversal. (a) Diámetro 32,5 mm. (b) Diámetro 36,3 mm. (c) Diámetro 38,3 mm. (d) Diámetro 42,0 mm ....</i>	<i>185</i>
<i>Figura 159. Ensayos de dureza de la resina en el laboratorio de máquinas y herramientas de la FII. ....</i>	<i>187</i>
<i>Figura 160. Pesajes para determinar la densidad de la resina fraguada. ....</i>	<i>187</i>
<i>Figura 161. Probetas para Determinar la Capacidad de Absorción de Agua por la Resina. (a) Probetas Antes del Remojo en agua. (b) Probetas Después del Remojo. ....</i>	<i>189</i>
<i>Figura 162. Muestras de Resina Liberados del Tubo Simulador y la Barra Helicoidal Antes de su Tratamiento Térmico. ....</i>	<i>189</i>
<i>Figura 163. Estado de las Muestras de Resina Después del Tratamiento Térmico a 200 °C. ....</i>	<i>190</i>
<i>Figura 164. Estado de las Muestras de Resina Después del tratamiento térmico a 400 °C. ....</i>	<i>190</i>
<i>Figura 165. Estado de la Resina Después de su Tratamiento Térmico a 400 °C. (a) Se Disgrega con Suma Facilidad. (b) Convertido en Ceniza Mancha los Dedos con Facilidad. ....</i>	<i>191</i>
<i>Figura 166. Barra Helicoidal Instalada con Lechada de Cemento Portland Tipo I. ....</i>	<i>192</i>
<i>Figura 167. Capacidad de Anclaje de las Barras Helicoidales Instaladas con Lechada de Cemento en Función de la LEA ....</i>	<i>192</i>
<i>Figura 168. Capacidad de anclaje de las Barras Helicoidales instaladas con lechada de cemento en función del diámetro del tubo simulador. ....</i>	<i>193</i>
<i>Figura 169. Elongación de las Barras Helicoidales Instaladas con Lechada de Cemento en Función de la Carga Aplicada. ....</i>	<i>194</i>
<i>Figura 170. Seccionamiento de Barras Helicoidales Instaladas con Lechada de Cemento. ....</i>	<i>195</i>
<i>Figura 171. Probetas de la Barra Helicoidal Instaladas con Lechada de Cemento. ....</i>	<i>196</i>
<i>Figura 172. Posición de la Barra Helicoidal Instalada con Lechada de Cemento en Distintos Segmentos de Tubos Simuladores. (a) En 33 mm de Diámetro. (b) En 42 mm de Diámetro. ....</i>	<i>197</i>
<i>Figura 173. Porosidad de la Lechada de Cemento Fraguada en Distintos Diámetros de Tubos Simuladores en Corte Transversal. (a) Diámetro 32,5 mm. (b) Diámetro 36,3 mm. (c) Diámetro 38,3 mm. (d) Diámetro 42 mm ....</i>	<i>197</i>
<i>Figura 174. Adherencia y Acoplamiento de la Lechada de Cemento en Tubo Simulador de 32,5 mm. (a) En la Barra Helicoidal. (b) En la Pared del Tubo Simulador. ....</i>	<i>199</i>
<i>Figura 175. Adherencia y Acoplamiento de Lechada de Cemento en Tubo Simulador de 36,3 mm. (a) En la Barra Helicoidal. (b) En la Pared del Tubo Simulador. ....</i>	<i>199</i>
<i>Figura 176. Adherencia y Acoplamiento de la Lechada de Cemento en Tubo Simulador de 38,3 mm. (a) En la Barra Helicoidal. (b) En la Pared del Tubo Simulador. ....</i>	<i>200</i>
<i>Figura 177. Adherencia y Acoplamiento de la Lechada de Cemento en Tubo Simulador de 42 mm. (a) En la Barra Helicoidal. (b) En la Pared del Tubo Simulador. ....</i>	<i>200</i>
<i>Figura 178. Factores que Afectan la Adherencia. (a) Oxido en la Barra Helicoidal. (b) Porosidad en la Lechada de Cemento. ....</i>	<i>201</i>

Figura 179. Estado de la Lechada de Cemento por la Acción del Péndulo Charpy. (a) Probeta antes de la Prueba. (b) Caída de 50°. (c) Caída de 60°. (d) Caída de 70°.	202
Figura 180. Ensayos de Dureza de la Lechada de Cemento Fraguada.	203
Figura 181. Ensayo para Determinar la Capacidad de Absorción de Agua por la Lechada de Cemento. (a) Pesaje la Probeta seca. (b) Probetas Secas. (c) Probetas Húmedas.	204
Figura 182. Muestras de Lechada de Cemento Liberadas del Tubo y la Barra Helicoidal Antes de su Tratamiento Térmico	205
Figura 183. Estado de las Muestras de Lechada de Cemento Después del Tratamiento Térmico a 200 °C.	206
Figura 184. Estado de las Muestras de Lechada de Cemento, Después del Tratamiento Térmico a 400 °C.	206
Figura 185. Capacidad de Anclaje de los Pernos Hydrabolt y Swellex (X-Pandabolt) Vs LEA	208
Figura 186. Capacidad de Anclaje Comparativo de los Pernos Hydrabolt y Swellex Función del Diámetro de los Tubos Simuladores	209
Figura 187. Elongación de los Pernos Hydrabolt y Swellex para 4 pies de LEA en Diferentes Diámetros de Tubos Simuladores.	210
Figura 188. Acoplamiento de los Pernos Hydrabolt y Swellex en las Paredes de los Tubos Simuladores.	211
Figura 189. Areas con o sin Contacto en los Hydrabolt y Swellex (X-Pandabolt) Vs Diámetro del tubo simulador	212
Figura 190. Capacidad de anclaje de las barras helicoidales instaladas en tubos simuladores de 32,5 mm (33 mm) con cartuchos de cementicio y resina y, lechada de cemento en función de la LEA.	213
Figura 191. Capacidad de Anclaje de las Barras Helicoidales Instaladas en Tubos Simuladores de 36,3 mm (36 mm) con Cartuchos de Cementicio, Resina y Lechada de Cemento en Función de la LEA.	214
Figura 192. Capacidad de Anclaje de la Barra Helicoidal Instaladas en Tubos Simuladores de 38,3 mm con Cartuchos de Cementicio, Resina y Lechada de Cemento en Función de la LEA	215
Figura 193. Capacidad de Anclaje de las Barras Helicoidales Instaladas en Tubos Simuladores de 42 mm con Cartuchos de Cementicio, Resina y Lechada de Cemento en Función de la LEA.	216
Figura 194. Capacidad de Anclaje de las Barras Helicoidales en Función de la LEA Instaladas en Diferentes Tubos Simuladores y Materiales de Acoplamiento.	217
Figura 195. Capacidad de anclaje de las barras helicoidales en función del diámetro de tubo simulador para 1 pie de LEA.	219
Figura 196. Capacidad de Anclaje de las Barras Helicoidales en Función del Diámetro del Tubo Simulador para 2 pies de LEA.	221
Figura 197. Capacidad de Anclaje de las Barras Helicoidales en Función del Diámetro del Tubo Simulador para 3 pies de LEA.	221
Figura 198. Capacidad de anclaje de las barras helicoidales en función del diámetro del tubo simulador para 4 pies de LEA.	223
Figura 199. Capacidad de anclaje de las barras helicoidales en función del diámetro del tubo simulador para diferentes LEAs y diferentes materiales de acoplamiento.	224
Figura 200. Barras Helicoidales Seccionadas para Analizar su Centrado en Distintos Tipos de Materiales y Diámetros	225
Figura 201. Porosidad de los Materiales de Acoplamiento de las Barras Helicoidales. (a) Cartuchos de Cementicio. (b) Cartuchos de Resina. (c) Lechada de Cemento.	227
Figura 202. Acoplamiento de los Pernos Hydrabolt y X-Pandabolt en las Paredes de los Tubos Simuladores	230
Figura 203. Areas de Contacto Porcentuales de los Pernos Hydrabolt y Swellex (X-Pandabolt) con las paredes de los tubos simuladores	231
Figura 204. Acoplamiento de los Split Sets en Diferentes Tubos Simuladores	231
Figura 205. Presencia de Envoltorios Plásticos de los Materiales de Acoplamiento Cuando se Instalan las Barras Helicoidales. (a) Barras Helicoidales con Cartuchos de Cementicio. (b) Barras Helicoidales con Cartuchos de Resina.	234
Figura 206. Presencia del Envoltorio Plástico en las Barras Helicoidales Instaladas con Cartuchos de Resina en Corte Longitudinal. (a) Envolviendo a la Barra Helicoidal. (b) Pegado a la Pared del Tubo simulador	236
Figura 207. Capacidad de Anclaje de Pernos Instalados en Tubos Simuladores de 32,5 mm Vs LEA.	242
Figura 208. Capacidad de Pernos de Rocas Instalados en Tubos Simuladores de 36,3 mm Vs LEA	243
Figura 209. Capacidad de Anclaje de Pernos de Roca Instalados en Tubos Simuladores de 38,3 mm Vs LEA	244
Figura 210. Capacidad de anclaje de los Hydrabolt y X-Pandabolt instalados en tubos simuladores de 40,96 mm Vs LEA.	245
Figura 211. Capacidad de anclaje de las barras helicoidales instaladas en tubos simuladores de 42 mm Vs LEA y distintos morteros.	246
Figura 212. Capacidad de Anclaje de Pernos de Roca Instalados en Tubos Simuladores de Diferentes Diámetros en Función de la LEA.	249

Figura 213. Capacidad de Anclaje de los Pernos de Roca en Función del Diámetro de Tubo Simulador para XXI 1 pie de LEA.....	251
Figura 214. Capacidad de Anclaje de los Pernos de Roca en Función del Diámetro de Tubo Simulador para 2 pies de LEA.....	252
Figura 215. Capacidad de Anclaje de los Pernos de Roca en Función del Diámetro de Tubo Simulador para 3 pies de LEA.....	254
Figura 216. Capacidad de Anclaje de los Pernos de Roca Vs Diámetro de Tubo Simulador para 4 pies de LEA .....	255
Figura 217. Capacidad de Anclaje de los Pernos de Roca en Función del Diámetro de Tubo Simulador y Diferentes LEAs.....	258
Figura 218. Elongación de los Pernos de Roca Vs Carga Aplicada para 1 pie de LEA y Diferentes Diámetros de Tubos Simuladores.....	260
Figura 219. Elongación de los Pernos de Roca Vs Carga Aplicada para 2 pies de LEA y Diferentes Diámetros de Tubos Simuladores.....	261
Figura 220. Elongación de los Pernos de Roca Vs Carga Aplicada para 3 pies de LEA y Diferentes Diámetros de Tubos Simuladores.....	262
Figura 221. Elongación de los Pernos de Roca Vs Carga Aplicada para 4 pies de LEA y Diferentes Diámetros de Tubos Simuladores.....	263
Figura 222. Capacidad de Anclaje de las Barras Helicoidales en Taladros (mina) y Tubos Simuladores (laboratorio) de 36 mm en Función de la LEA.....	266
Figura 223. Capacidad de Anclaje de Pernos de Roca Instalados en Taladros y Tubos Simuladores de 38 mm en Función de la LEA.....	268
Figura 224. Capacidad de Anclaje de Pernos de Roca Instalados en Taladros (mina) y Tubos Simuladores (laboratorio) de 36 y 38 mm de Diámetro en Función de la LEA.....	269
Figura 225. Demanda Porcentual de Pernos de Roca en la Minería Subterránea Peruana en Función de su Longitud.....	274
Figura 226. Perforadora Seco E39 3X, durante la instalación de barras helicoidales en la Mina Castrovirreyna .....	275
Figura 227. Compresor Portátil Atlas Copco XAS 97 Dd.....	276
Figura 228. Emisión Mensual de Aceite al Ambiente Cuando los Pernos se Instalan con Equipo Manual .....	279
Figura 229. Emisión Mensual de CO <sub>2</sub> al Ambiente Cuando los Pernos se Instalan con Equipo Manual .....	280
Figura 230. Emisión Mensual de Calor al Ambiente Cuando los Pernos se Instalan con Equipo Manual .....	281
Figura 231. Empernadora Sandvik Robolt DS311.....	281
Figura 232. Emisión Mensual de Aceite al Ambiente por la Empernadora Robolt DS311 en la Instalación de Pernos de Roca de 2.1 m.....	283
Figura 233. Emisión Mensual de Dióxido de Carbono por la Empernadora Robolt DS311.....	286
Figura 234. Emisión de Calor por el Funcionamiento del Motor Eléctrico de la Empernadora Robolt DS311.....	289
Figura 235. Horas Mensuales de Trabajo en la Instalación de Pernos de roca.....	290
Figura 236. Consumo Mensual de Combustible para la Instalación de Pernos de Roca con Equipo Manual y Mecanizado.....	292
Figura 237. Consumo Mensual de Aire Comprimido Para la Instalación de Pernos de Roca con Equipo Manual y mecanizado.....	293
Figura 238. Consumo Mensual de Agua Para la Instalación de Pernos de Roca con Equipo Manual y Mecanizado.....	294
Figura 239. Consumo Mensual de Aceite Hidráulico en la Instalación de Pernos de Roca con Equipo Manual y Mecanizado.....	295
Figura 240. Requerimiento de Aire de Ventilación Mensual en la Instalación de Pernos de Roca con Equipo Manual y Mecanizado.....	297
Figura 241. Emisión de Aceite al Medio Ambiente Mensual en la Instalación de Pernos de Roca con Equipo Manual y Mecanizado.....	299
Figura 242. Emisión de Calor al Medio Ambiente Mensual en la Instalación de Pernos de Roca con Equipo Manual y Mecanizado.....	300
Figura 243. Emisión de Dióxido de Carbono al Medio Ambiente Mensual en la Instalación de Pernos de Roca con Equipo Manual y Mecanizado.....	302

%:	Porcentaje
@:	A razón de...
°C:	Grado centígrado (Celsius)
µm:	Micrómetro
a°:	a grados sexagesimales (medida de ángulo)
cal:	Calorías
cyl:	Cilindro
d:	Día
De:	Dimensión equivalente
E:	Módulo de elasticidad de Young
f:	Factor de seguridad
F:	Fuerza de anclaje
g/cc:	Gramos por centímetro cúbico
g:	Gramo
h:	Altura de la capa de roca sostenida
h:	Hora
hp:	Horse power (caballo fuerza)
Hz:	Herz
Ja:	Número de alteración de fisuras
Jn:	Número de sistemas de fisuras
Jr:	Número de rugosidad de las fisuras
Jw:	Factor de reducción por la presencia de agua en las fisuras
kcal:	Kilocalorías
kgf:	Kilogramo fuerza
kN:	kilo Newton
kW:	Kilowatt
kWh:	Kilowatt hora
l o L:	Litro
lb:	Libra
min:	Minuto
mm:	Milímetro
MPa:	Mega pascal
N:	Newton
N°:	Número
P:	Fuerza de tensión.
ppm:	Partes por millón
pulg:	Pulgada
Q:	Índice de calidad de túneles
rpm:	Revoluciones por minuto
s:	Segundos
SRF:	Factor de reducción por esfuerzos
t:	Tonelada métrica (1000 kg)
ton:	Tonelada corta (2000 lb)
ρ:	Densidad de la roca
τα:	Fuerza de adherencia entre el cemento y el acero.
τb:	Fuerza de adherencia entre el cemento y la roca o suelo.
Φ:	Diámetro

### Lista de abreviaturas

AC: Corriente continua  
ASTM: American Society for Testing and Materials  
BHCC: Barra helicoidal instalada con cartuchos de cementicio  
BHCR: Barra helicoidal instalada con cartuchos de resina  
BHLC: Barra helicoidal instalada con lechada de cemento  
CC: Cartucho de cementicio  
CFM: Cubic feet per minute (pies<sup>3</sup>/min)  
Cía.: Compañía  
CR: Cartucho de resina  
DC: Corriente directa  
EAP: Escuela Académico Profesional  
ESR: Excavation support ratio  
FIGMMG: Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica  
FII: Facultad Ingeniería Industrial  
HB: Dureza Brinell  
HL: Dureza Leeb  
HRA: Dureza Rockwell escala A  
HRB: Dureza Rockwell escala B  
HRC: Dureza Rockwell escala C  
HS: Dureza Shore  
HV: Dureza Vickers  
Hz: Hertz (golpes/s)  
LC: Lechada de cemento  
LEA: Longitud efectiva de anclaje (bond Light)  
MINEM: Ministerio de Energía y Minas  
mm: Milímetro  
MRMR: Modified rock mass rating  
NATM: New Austrian Tunneling Method  
NCM: New Concept Mining  
NTP: Norma técnica peruana  
OSINERGMIN Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería  
PSI: Poundal square inch (lb/pulgada<sup>2</sup>)  
PUCP: Pontificia Universidad Católica del Perú  
RMR: Rock mass rating  
RPM: Revoluciones por minuto  
RQD: Rock quality designation  
TBM: Tunnel boring machine  
UNACEM: Unión andina de cementos  
UNMSM: Universidad Nacional Mayor de San Marcos  
URL: Uniform resource locator  
V: Voltio  
W: Watt  
WI: Work index  
DTS: Diámetro de tubo simulador

Considerando que, en la industria minera se emplea únicamente el Sistema Internacional de Unidades (SI), sino también el sistema inglés, como ejemplo se pueden citar: los diámetros de perforación, normalmente se expresan en pulgadas; el equipo de arranque (pull test) viene especificado en PSI o toneladas cortas (ton); la longitud de los pernos viene especificado en pies; los commodities de metales se cotizan por libras, toneladas cortas u onza troy; la madera se cubica en pies<sup>3</sup>; los LHD y las palas se especifican en yd<sup>3</sup>, etc. Por estas consideraciones, se incluye esta hoja de conversión de unidades utilizadas en este estudio.

**Unidades de longitud (unidad base: Metro (m))**

Centímetro (cm)	=	10 <sup>-2</sup> m
Kilómetro (km)	=	1000 m
Micrómetro (μm)	=	0,001 mm = 10 <sup>-6</sup> m
Milímetro (mm)	=	10 <sup>-3</sup> m
Pie (pie o ‘)	=	12 pulg = 30,48 cm = 0,3048 m
Pulgadas (pulg o “)	=	2,54 cm = 0.0254 m
Yarda (yd)	=	3 pies = 91,44 cm = 0,9144 m

**Unidades de masa o peso (unidad base: Kilogramo (kg)):**

Gramos (g)	=	10 <sup>-3</sup> kg
Libra (lb)	=	453,592 g = 0,453592 kg
Toneladas cortas (ton)	=	2000 lb = 0,907184 t = 907,184 kg
Toneladas métricas, tonne (t)	=	1000 kg

**Unidades de Volumen (unidad base: Metro cúbico (m<sup>3</sup>)):**

Centímetro cúbico (cm <sup>3</sup> )	=	10 <sup>-6</sup> m <sup>3</sup>
Cilindro (cyl)	=	55 gal = 208 L = 0,208 m <sup>3</sup>
Decímetro cúbico (dm <sup>3</sup> )	=	1000 cm <sup>3</sup> = 10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
Litro (l o L)	=	1 dm <sup>3</sup> = 10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
Pie cúbico (pie <sup>3</sup> )	=	28 316,85 cm <sup>3</sup> = 28,31685 L = 0,028 316 m <sup>3</sup>
US Barril (bb)	=	31,5 gal = 119,237 13 L = 0,119 237 13 m <sup>3</sup>
US galón (gal)	=	0,133 68 pies <sup>3</sup> = 3,785 412 L = 0,003 785 4 m <sup>3</sup>
Yarda cúbica (yd <sup>3</sup> )	=	27 pies <sup>3</sup> = 764,554 L = 0,764554 m <sup>3</sup>

**Unidades de presión:**

Atmósfera (atm)	=	760 mm Hg = 1,033 23 kg/ cm <sup>2</sup> = 14,696 psi
Bar (bar)	=	10 <sup>6</sup> Pa = 14,503 8 psi = 1,019 716 kg/ cm <sup>2</sup>
Libras por pulg <sup>2</sup> (psi)	=	0,068 947 6 bar = 0,070 306 9 kg/cm <sup>2</sup> = 6 894,757 Pa
Mega Pascal (MPa)	=	10 <sup>6</sup> Pascal = 10 bar = 145,038 psi
Pascal (Pa)	=	10 dinas/cm <sup>2</sup> = 1 N/m <sup>2</sup>

**Otras unidades:**

Pies <sup>3</sup> por minuto (CFM)	=	1 698,963 L/min = 0,028 316 m <sup>3</sup> /s = 1,699 m <sup>3</sup> /min
Galón por minuto (gpm)	=	0,063 088 L/s = 3,785 411 L/min = 0,003 785 4 1 m <sup>3</sup> /min
Newton (N)	=	0,101 971 kgf
Kilo Newton (kN)	=	1000 N = 101,971 kgf
Kilocaloría (kcal)	=	1000 cal
Kilowatt hora (kWh)	=	3600 kJ = 860,420 6 kcal = 1000 Wh
Caballo Fuerza (hp)	=	641,6 kcal = 745,7 Wh = 0,745 7 kWh



## Glosario

*i.Arandelas de arranque:* Son piezas fabricadas de planchas de fierro, acorde con la abertura del gancho de la mordaza del equipo de arranque y el diámetro del perno de roca. Su función es proteger el gancho de la mordaza y sujetar apropiadamente el cabeza de los pernos durante las pruebas de arranque.

*ii.Arandelas de tope:* Son piezas fabricadas de planchas de fierro, de sección cuadrada y con perforación en función del diámetro de los tubos simuladores, que luego de encajados en uno de los extremos de los mismos son soldados. Su función es garantizar un adecuado acoplamiento de la boca del tubo simulador por debajo de la mesa, de tal forma que la acción de la fuerza tracción durante las pruebas de arranque, este completamente dirigida a los pernos. Asimismo, para evitar daños a los bordes de la ranura de encaje de la cabeza de los pernos de roca.

*iii.Capacidad de anclaje del perno de roca:* Es la carga que puede soportar un perno de roca, antes de rendirse o ceder luego de cierta elongación. Se mide mediante las pruebas de arranque (pull test).

*iv.Cartucho de cementicio:* Es una mezcla de arena fina, cemento y aditivos que se presentan envasados en bolsas plásticas, que en conjunto adquieren la forma de cartuchos. Las bolsas plásticas tienen perforaciones para permitir el ingreso de agua durante el remojo, antes de introducirlos dentro de los taladros o tubos simuladores.

*v.Cartuchos de resina:* Es un material de acoplamiento de barras helicoidales, que viene envasado en bolsas plásticas cuyo interior está dividido en toda su longitud por un diafragma, separando la pasta de resina y catalizador químico. El mezclado de ambos componentes se logra por la rotación del equipo de instalación (perforadoras rotopercutivas).

*vi.Densidad de pernos:* Indica la cantidad de pernos instalados por unidad de área, normalmente por metro cuadrado.

*vii.Densidad de pernos:* Indica la cantidad de pernos instalados por unidad de área, normalmente por metro cuadrado.

*viii.Elongación:* Es el estiramiento que sufre el perno por la acción de una carga, se mide con un vernier durante la prueba de arranque y se considera hasta que el perno cede y comienza salirse del taladro o tubo simulador.

*ix. Equipo de arranque:* Equipo utilizado para determinar la capacidad de anclaje de <sup>xxvi</sup> los pernos de roca, consta de una bomba manual, manómetro, manguera de impulsión y cilindro hidráulico.

*x. Lechada de cemento:* Es una pasta de cemento portland tipo I, que se logra mezclando el cemento con el agua, que luego es vertido dentro de los taladros o tubos simuladores antes de introducir las barras helicoidales.

*xi. Longitud efectiva de anclaje (bond length):* Es la longitud de perno que efectivamente sostiene la roca, cuando se instala en un macizo rocoso. Es la porción de perno que se ubica en el fondo del taladro donde se instala.

*xii. Material de acoplamiento:* Es un complemento de los pernos que requieren de un mortero para hacer anclaje, puesto que los pernos por sí mismos no se acoplan a las paredes del taladro o tubo simulador, sino que requieren de un material de interface que englobe al mismo perno y se acople a las paredes del taladro. Los cartuchos de cementicio y resina y, lechada de cemento son los materiales de acoplamiento.

*xiii. Mesa para determinar la capacidad de anclaje de pernos de roca:* Es una mesa de fierro y acero, que sustituye al terreno (hastial) para realizar las pruebas de arranque y así determinar la capacidad de anclaje de los pernos.

*xiv. Perno de barra rígida:* Son pernos de acero sólido, que requieren un mecanismo adicional para que hagan anclaje, como cuñas, concha de expansión o materiales de acoplamiento. Dentro de este tipo de pernos se tienen las barras helicoidales, barras con ranura y cuña, barras con concha de expansión, pernos auto perforantes, entre otros.

*xv. Perno de roca inflable:* Es un perno construido de un tubo, cuyo diámetro ha sido reducido para facilitar su instalación en los taladros perforados, mediante un proceso de aplanado y enrolado adquiriendo la forma de la letra “C” de doble pared; que al inflar con agua a una presión de 25 a 30 MPa, se expande acoplándose en las paredes del taladro o tubo simulador, haciendo anclaje, dentro de estos pernos se pueden citar al Swellex, Hydrabolt y X-Pandabolt.

*xvi. Perno de roca:* Es una herramienta diseñada para soportar la capa de roca inestable en una excavación en un macizo rocoso, para cuya instalación es necesario perforar un taladro.

*xvii. Pernos de constricción:* Estos pernos son básicamente los Split Sets, se caracterizan por que, al introducirlos dentro de los taladros, se cierra la ranura que tiene en toda su longitud haciendo presión contra las paredes de los taladros o tubos simuladores, haciendo anclaje.

*xviii. Prueba de arranque (pull test):* consiste en tratar de extraer el perno del taladro<sup>xxvii</sup> donde se encuentra instalado, utilizando para ello, un equipo denominado “equipo de arranque”, conformado básicamente por un cilindro hidráulico, una torre con su gancho, bomba hidráulica manual.

*xix. Spiling:* Es un método de reforzamiento de terreno suelto diseñado para maximizar las dimensiones e integridad del perfil del túnel. La operación básica es perforar una serie de taladros a espacios predeterminados justo fuera de la línea promedio del túnel sin invadir dentro de la línea de excavación diseñada. El espaciamiento de taladros depende de las condiciones de la roca, variando entre 100 y 300 mm como máximo. El diámetro de la barra de acero como tendón era 1”.

*xx. Tubo de estrangulamiento:* Es un tubo que restringe la expansión de los pernos inflables más allá de la longitud efectiva de anclaje deseado.

*xxi. Tubo simulador:* Es un tubo de diámetro interior conocido, que reemplaza a un taladro perforado en roca, para instalar pernos de roca a fin de determinar su capacidad de anclaje, elongación, acoplamiento y propiedades del material de acoplamiento en caso de las barras helicoidales.

## **Capítulo 1**

### **Introducción**

El sostenimiento de macizos rocosos es fundamental para evitar los desprendimientos de rocas, sean éstos, a consecuencia de la actividad humana o de la propia naturaleza, dado que, dependiendo de su magnitud, los desprendimientos de rocas pueden ocasionar muerte, destrucción y contaminación ambiental. En operaciones de excavación (obras civiles y minería), el oportuno y adecuado sostenimiento de la roca remanente, además de prevenir impactos ambientales, significa productividad, seguridad, continuidad de la operación, rentabilidad y prestigio empresarial. En caso de desprendimiento de rocas por causas naturales, sobre estructuras y centros poblados es posible prevenir su ocurrencia, haciendo inspecciones periódicas por especialistas para establecer las acciones correctivas, entre ellas, de ser necesario, aplicar los elementos de sostenimiento más apropiados.

Actualmente existen una amplia gama de técnicas y elementos de sostenimiento, para evitar los desprendimientos de rocas. Dentro de ellos, los de mayor aplicación son los pernos de roca, temporales o definitivos. En el mercado existen distintos tipos de pernos de roca como las barras rígidas de acero (barras helicoidales, auto perforantes, etc.), pernos inflables (Swellex, Hydrabolt, etc.) y de constricción (Split Set y Tubo Bolt). Todos los pernos de roca para su instalación, requieren previamente la perforación de taladros (con perforadoras manuales o mecanizados) de una profundidad compatible con su longitud.

Uno de los principales parámetros que afecta la capacidad de anclaje de los pernos de roca, es el diámetro de los taladros donde se instalan. Por ejemplo, en caso de los pernos inflables, que se fabrican por aplanado y rolado de tubos de acero de un diámetro determinado, al pretender instalarlos en taladros de diámetros superiores al de los tubos originales (diámetro de máxima expansión), no hará anclaje en absoluto. A pesar de esta importancia para obtener el máximo rendimiento de los pernos de roca, el diámetro de los taladros donde se instalan, es un parámetro poco estudiado. Los diámetros de los taladros donde se instalan los pernos de roca, son sugeridos por los fabricantes o proveedores, sin que éstos sean los óptimos, salvo alguna excepción.

Para determinar la capacidad de anclaje de los pernos de roca en una operación, se realizan las pruebas de arranque (pull test), siguiendo un protocolo para ello. Primero se perforan los taladros de diámetro y profundidad sugeridas por el proveedor, en los hastiales de la excavación más próxima del área donde se pretende determinar la capacidad de anclaje de un perno de roca. Luego, se instalan los pernos (en caso de las barras helicoidales, se introducen primero el mortero de acoplamiento), introduciéndolos dentro de los taladros (por percusión, rotopercusión o simplemente se coloca, como es el caso de los penos inflables), luego de un tiempo prudente (en caso de las barras helicoidales, se requiere un tiempo curado del mortero), se procede con la prueba de arranque. Para lo cual, se usa un equipo que consta de una bomba manual, manómetro y un cilindro hidráulico que tratará de extraer el perno del taladro, registrándose la máxima carga que indica el manómetro del equipo. A esta carga pico, se considera la capacidad de anclaje del perno; simultáneamente, en el vástago del cilindro hidráulico se mide y registra la elongación (estiramiento) del perno.

Dado que para la realización de las pruebas de arranque en una operación (terreno real), se requieren equipos, maquinaria, personal, herramientas, energía y toda la logística necesaria, requerimientos que son proporcionados por la empresa auspiciadora (minera). Debido a lo antes expuesto, casi ninguna empresa está dispuesta a apoyar a este tipo de iniciativas; considerando el alto costo que representan y evitar distraer recursos y las exigencias de producción. Además, en un terreno real es imposible encontrar la misma calidad de roca (clase I o II) para todas las pruebas y tipos de pernos que demanda un estudio de esta naturaleza. Asimismo, es imposible mantener constante el diámetro de los taladros donde instalan los pernos, por el desgaste que sufren los elementos de corte (brocas) de un taladro a otro. Por consiguiente, para realizar el presente estudio, bajo las mismas condiciones de terreno e iguales diámetros de los taladros, se ideó una metodología para realizar las pruebas de arranque en el laboratorio, sustituyendo el hastial del terreno, por una mesa de metal resistente y los taladros, por tubos de acero.

La mesa para determinar la capacidad de anclaje de pernos de roca, se diseñó y construyó de fierro y acero en un taller metal mecánico, instrumento que ha sido patentado por el autor ante INDECOPI. Los tubos que reemplazaron a los taladros, fueron denominados “tubos simuladores”, herramientas que garantizaron el mismo diámetro para cualquier tipo de perno y número de ensayos. Adicionalmente, en caso de los pernos inflables, imposibles de cortarlos para una determinada “longitud efectiva de anclaje”

(LEA), se usó el artificio del tubo de estrangulamiento, para permitir que se expanda únicamente en una longitud igual a la LEA.

Para cumplir con los objetivos del presente estudio, se planteó usar los pernos de roca de mayor aplicación en el Perú y el mundo: las barras helicoidales, Split Sets, Hydrabolt y Swellex (X-Pandabolt). Para disponer de estos elementos de sostenimiento, se gestionó a distintas empresas mineras y proveedores en calidad de donación, atendiendo a este llamado la Cía. Minera Poderosa y New Concept Mining. Cabe destacar que, para las pruebas llevadas a cabo en la Mina Castrovirreyna, se contó con la colaboración de Prodac, New Concept Mining, Aceros Arequipa y Atlas Copco (hoy Epiroc) y, todo lo concerniente a equipos, personal, energía y las facilidades pertinentes, fueron proporcionadas por dicha Cía. minera.

A fin contar con los datos que conduzcan a demostrar la influencia del diámetro de los taladros sobre sus capacidades de anclaje, se establecieron cuatro tamaños de diámetros para cada perno, comprendido entre 32,5 a 42 mm. Asimismo, por cada diámetro se ensayaron 4 longitudes efectivas de anclaje (1, 2, 3 y 4 pies) y por cada combinación se hicieron 3 a 4 pruebas, totalizando 296 ensayos de laboratorio y 64 pruebas en la mina Castrovirreyna.

Los tubos simuladores y de estrangulamiento, fueron acondicionados de acuerdo a lo diseñado, en el taller metal – mecánico Mujipro (corte, trabajos de soldadura, fresado, etc.). La instalación e inflado de los pernos inflables, se llevó a cabo en la planta del Cía. New Concept Mining por el requerimiento de entre otros equipos, de compresores, bombas hidroneumáticas, imposibles de hacer su traslado a la sede de la EP Ingeniería de Minas. En caso de las barras helicoidales (acoplados con lechada de cemento, cartuchos de cementicio y resina) y los Split Sets fueron instalados en la sede de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas (EPIM) de la UNMSM, utilizando rotomartillos eléctricos (para las barras helicoidales) y herramientas (combas, adaptadores, etc.) para los Split Sets. Todas las pruebas de arranque de los pernos instalados en tubos simuladores, se llevaron a cabo en el laboratorio acondicionado en la sede de la EPIM, pruebas en las que se registraron las capacidades de anclaje y las elongaciones de los pernos.

Para el análisis del acoplamiento de los pernos de roca en las paredes de los tubos simuladores (taladros), las propiedades físicas de los morteros de las barras helicoidales, se

tuvo que preparar probetas mediante seccionamiento de muestras de pernos instalados en distintos diámetros de tubos simuladores, tanto transversal como longitudinalmente, estos trabajos de corte y fresado se realizaron en un taller metal mecánico. Con estas probetas, se hicieron el estudio de las distintas propiedades del mortero de acoplamiento de las barras helicoidales como: aspereza, rugosidad, porosidad, dureza, entre otros en el laboratorio de máquinas y herramientas de la Facultad de Ingeniería Industrial de la UNMSM. Los ensayos para determinar las densidades de los morteros y absorción de agua, se hizo lo propio los laboratorios de Biometalurgia y Piro Metalurgia de la EP de Ingeniería Metalúrgica de la UNMSM.

Los contactos y aberturas que se generan entre las paredes de los tubos simuladores y los pernos inflables y de constricción, fueron analizados en los segmentos de pernos instalados dentro de los tubos simuladores, que fueron cortados con una tronadora (cortador eléctrico), cortes que luego fueron pulidos para delatar las aberturas con navajas de acero duro. El espesor de las aberturas se midió usando calibradores de acero (lengüetas de diferentes espesores). Cabe destacar que, estos trabajos de corte, pulido y calibración de aberturas se llevaron a cabo en la sede de la EPIM.

Todos los datos fueron registrados en formatos diseñados para cada etapa del estudio, empezando por la codificación de muestras, pruebas de arranque (carga y elongación), control de probetas y registro de las propiedades físicas de los morteros utilizados con las barras helicoidales, registro de los contactos y aberturas de los pernos inflables y de constricción, entre otros. Todos los datos registrados fueron compilados y procesados en un programa estadístico y en Excel. Con estos resultados cuantitativos y cualitativos, se hicieron las discusiones pertinentes y las conclusiones del estudio.

Los resultados del estudio se presentan por tipo de perno, empezando por la capacidad de anclaje en función de la longitud efectiva de anclaje (LEA), luego en función del diámetro de los tubos simuladores (taladros), su elongación en función de la carga aplicada. Asimismo, los contactos y aberturas en caso de los pernos inflables y de constricción y el acoplamiento en caso de las barras helicoidales, con lo cual se hace la discusión de los resultados. Posteriormente, se hace una discusión de los resultados por familias de pernos, es decir, pernos inflables (Swellex, Hydrabolt y X-Pandabolt), barras helicoidales instaladas con cartuchos de cementicio, cartuchos de resina y lechada de cemento y los pernos por constricción (Split Sets). Finalmente, se hace una discusión de las

capacidades de anclaje y otras cualidades de todos los pernos estudiados. Demostrándose concretamente, la influencia del diámetro de los tubos simuladores (taladros) sobre la capacidad de anclaje de los pernos de roca.

Establecidos los diámetros y las longitudes efectivas de anclaje óptimos, se hizo un análisis de la reducción del número de pernos por cada 100 m<sup>2</sup> de sostenimiento, a fin de determinar su reducción porcentual, demostrándose que, al optimizar los diámetros de los taladros, el número de pernos se reduce entre 2 % y 23 %. Asimismo, para cuantificar los efectos de los gastos y emisiones ocasionados por la aplicación de pernos de roca, fue necesario investigar sobre la demanda actual de pernos de roca en la minería peruana (tipos, tamaños, etc.), determinándose que las longitudes de pernos más usados son los de 2,10 m (7 pies) de longitud, con 79 % del consumo total en promedio. Fue necesario también, establecer el método de instalación de los pernos, manual y mecanizado; pero por la dificultad para determinar el porcentaje de pernos que son instalados con uno u otro sistema, se hizo el análisis por separado, suponiendo que, en un caso, todos los pernos se instalan con equipo manual, en otro, con equipo mecanizado, ambos casos al nivel del mar.

La reducción del empleo de número de pernos de roca, implica menor tiempo de instalación, en consecuencia, la reducción de consumos de combustibles, aceites, agua, aire entre otros. A la par, la reducción de emisiones contra el ambiente, como el dióxido de carbono, calor y aceites. Como se ha indicado en el párrafo anterior, el análisis de los efectos ambientales ocasionados por la instalación de pernos, manual o mecanizado, se ha llevado a cabo por separado. Se demuestra que, al optimizar los diámetros de los taladros, se reduce sustancialmente la emisión de contaminantes; por ejemplo, la emisión del CO<sub>2</sub> se reduciría mensualmente en 135537 kg (más de 135 TM) y 5062 kg (más de 5 TM), instalando los pernos con equipo manual o mecanizado, respectivamente.

Haciendo un recuento, el contenido de la presente tesis consta de 9 capítulos, donde el Capítulo I corresponde a la introducción, formulación del problema, justificación del estudio, objetivos e hipótesis del estudio. El Capítulo II, trata el marco teórico del estudio, empezando por la definición del medio ambiente y su clasificación, contaminación ambiental e impacto ambiental. Asimismo, un tratado sucinto sobre el macizo rocoso y su clasificación, así como sobre las excavaciones en macizos rocosos incluyendo los métodos de excavación. Seguidamente, se trata sobre los desprendimientos de rocas y sus causas; sostenimiento de macizos rocosos, tipos de sostenimiento, abundando sobre el sostenimiento



con pernos de roca. Finalmente, se habla sobre pernos de roca, su clasificación y rendimiento. El Capítulo III, corresponde al Marco Metodológico del estudio, donde se detalla todos los requerimientos y la secuencia seguida para la materialización del presente estudio como la infraestructura requerida, equipos, herramientas y materiales, tipo y diseño de la investigación, población y tamaño de muestra, áreas de pruebas, laboratorios y talleres, compilación y procesamiento de datos y finalmente la discusión de resultados.

Los Capítulos IV, V y VI, corresponden a los resultados del estudio de los Split Sets, Hydrabolt y X-Pandabolt, respectivamente; en cuanto a sus capacidades de anclaje en función de la LEA y diámetro del tubo simulador. Del mismo modo, su elongación y, contactos y aberturas de en función del diámetro del tubo simulador. Capítulo VII, presenta los resultados del estudio de las barras helicoidales, en cuanto a su capacidad de anclaje en función de la LEA y diámetro de los tubos simuladores, así como su elongación en función de la carga aplicada y diámetro de tubo simulador, propiedades físicas de los morteros utilizados para su instalación (cartuchos de cementicio, cartuchos de resina y lechada de cemento).

En el Capítulo VIII, se hace la discusión de resultados del estudio, empezando por las capacidades de anclaje en función de la LEA y diámetro del tubo simulador y, otros aspectos detallados en el capítulo VII. Seguidamente; se hace lo propio para todos los pernos en su conjunto, destacando sus cualidades antes tratados. Análogamente, en base los resultados anteriores se discute los efectos ambientales favorables al optimizar los diámetros de los taladros para instalar los pernos de roca. Finalmente, en el capítulo IX se presentan las conclusiones y recomendaciones del estudio.

## **1.1 Planteamiento del Problema**

**1.1.1 Situación problemática.** Las excavaciones en roca (minería y construcción civil), quizás sean las actividades que más han contribuido a su progreso y desarrollo de la humanidad. Puesto que, la ciencia, tecnología, industria y todo el quehacer del ser humano, en resumidas cuentas, se sustenta en el empleo o aplicación de elementos metálicos y no metálicos, provenientes primigeniamente de la actividad minera. Es decir, las grandes máquinas (ingenios, equipos de transporte, minadores, etc.), estructuras, herramientas, insumos y medicinas en su mayoría, son productos derivados de la minería. Asimismo, las grandes excavaciones civiles (túneles, carreteras, canales, presas, etc.) son excavaciones en

roca que han mejorado la calidad de vida de pueblos y comunidades enteras, además de propiciar su desarrollo.

Toda excavación en roca, requiere la estabilización del macizo rocoso (roca remanente) para prevenir los desprendimientos de rocas, que muchas veces causan muerte y contaminación del ambiente directa o indirectamente. Por ejemplo, en caso de la minería peruana, según reporta el Ministerio de Energía y Minas, más del 30 % de accidentes mortales ocurridos entre los años 2000 – 2018, fueron ocasionados por desprendimiento de rocas. Asimismo, El 59 % de accidentes mortales se produjeron en tajeo mineros, el 45,8 % en áreas no sostenidas y 53 % sobre perforistas y sus ayudantes (Giraldo, 2016).

Por tanto, el sostenimiento de excavaciones en roca es de vital importancia, para mantener el nivel de producción de una operación, seguridad para los equipos y personal, preservar la vida de las estructuras abiertas (túneles, galerías, cámaras, cavernas, etc.) y sobre todo, para reducir la contaminación ambiental que ocasionan los desprendimientos de roca, como: polución, emisiones de gases de efecto invernadero producidos por el funcionamiento de equipos utilizados para su eliminación, concentración de gases en las labores subterráneas, entre otros.

La economía del Perú se sustenta básicamente en la actividad minera, realizando por ello, grandes excavaciones en roca siguiendo un procedimiento o ciclo, que empieza con la perforación de taladros para voladuras hasta el sostenimiento de la roca remanente. Para el sostenimiento de macizos rocosos, actualmente existe una variedad de materiales y herramientas como: madera, concretos, fibras, mallas, pernos, cables, entre otros; de los cuales, los de mayor aplicación actualmente son los pernos de roca, en sus diversas formas y presentaciones, por su facilidad de instalación y capacidad de anclaje.

Los pernos de roca, se instalan dentro de taladros perforados previamente con ese propósito, con una profundidad similar a su longitud. Los pernos se introducen dentro de los taladros, solos (caso de los pernos inflables y constricción) o acompañados de materiales de acoplamiento o morteros (caso de las barras rígidas), con la finalidad que las paredes exteriores de los pernos con las de los taladros, queden en contacto para hacer anclaje por fricción o adherencia. Los taladros se perforan con diámetros sugeridos por los fabricantes o proveedores de pernos de roca, que no necesariamente son los más apropiados para obtener su mayor rendimiento. A pesar que, la capacidad de anclaje de los pernos de roca es muy sensible a la magnitud de los diámetros de taladros donde se instalan, existe escaso estudio

al respecto, es decir, no se han optimizado estos parámetros, para obtener su mayor rendimiento.

Optimizar los diámetros de los taladros para la instalación de los pernos de roca, implica tácitamente la reducción del número de pernos por unidad de área sostenida, que a su vez implica el requerimiento de menos horas máquina, mano de obra, menos insumos de sostenimiento, entre otros. Actualmente, los pernos de roca se instalan con equipo manual o mecanizado, en cualquiera de los casos, demandan el empleo de insumos como combustibles, lubricantes, aire, agua, entre otros y personal. Por tanto, al optimizar los diámetros de los taladros, habrá una reducción en las emisiones de gases (CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, etc.), calor, aceites, entre otros, sustancias nocivas para el medio ambiente.

### **1.1.2 Formulación del problema**

**A) *Problema general.*** ¿Influye el diámetro de taladros en el sostenimiento de macizos rocosos con pernos de roca para reducir los impactos ambientales?

**B) *Problemas específicos.***

**1.-** ¿Cómo influye el diámetro de taladros en la capacidad de anclaje de los pernos de roca?

**2.-** ¿Qué comportamiento tiene la capacidad de anclaje de los pernos de roca en función de su longitud efectiva de anclaje para diferentes diámetros?

**3.-** ¿Cómo influye el acoplamiento de los pernos de roca en las paredes de los taladros, sobre su capacidad de anclaje?

**4.-** ¿Cómo se reducen las emisiones al ambiente, al optimizar los diámetros de los taladros para la instalación de pernos de roca?

## **1.2 Justificación de la Investigación**

Mejorar la capacidad de anclaje de los pernos de roca, instalándolos en taladros de diámetros más apropiados, implica reducir su número por área sostenida, demandando menos horas de trabajo de equipos y personal. La reducción del número de pernos, se deriva en una serie de beneficios para la empresa (reducción de costos, seguridad para el personal y equipo, prestigio, etc.) y menor demanda de insumos de operación (combustibles, aceites,

agua, aire), que frecuentemene se traduce en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero al ambiente, aceites, calor, menor contaminación del agua y suelo, entre otros beneficios.

Actualmente, las pruebas de arranque (pull test) se realizan en los hastiales cercanos al área donde se requiere determinar la capacidad de anclaje de los pernos de roca, perforando para ello, taladros con cierto espaciamiento, sin garantizar que todos ellos queden posicionados en la misma calidad de roca, toda vez que el macizo rocoso es heterogéneo. Para cumplir con los objetivos de este estudio, se diseñó una metodología de laboratorio, sustituyendo los hastiales de pruebas por una mesa metálica y los taladros por tubos de acero denominándolos “tubos simuladores”, que posibilitan determinar la capacidad de anclaje de los pernos de roca, bajo las mismas condiciones de una prueba a otra, imposibles de disponer en un terreno real. Asimismo, esta metodología permite replicar las pruebas tantas veces sean necesarias, sin que varíen las condiciones de terreno y taladro. Este método permite también, realizar estudios comparativos de pernos de roca, en igualdad de condiciones, donde los “tubos simuladores” simulan la mejor calidad de roca, imposible de encontrar masivamente en la naturaleza.

Para realizar pruebas de arranque de pernos de roca, actualmente es preciso desplazarse a una operación de excavación (minera o civil), llevando consigo los pernos, equipos de arranque y toda la logística necesaria. A su vez, la empresa auspiciadora, se ve obligado a proporcionar además del área de pruebas, maquinaria, personal, servicios y facilidades de estadía, representando alto costo para la empresa y distracción del proceso productivo, razones por las cuales, cada prueba resulta demasiado costoso y prácticamente imposible de realizar en grandes cantidades como demanda un trabajo de investigación. Por tanto, la metodología establecida facilita determinar la capacidad de anclaje de los pernos de roca en laboratorio, al más bajo costo y sin necesidad de desplazarse a una operación de excavación.

Con las pruebas actuales (en campo), únicamente se pueden determinar las capacidades de anclaje y las elongaciones de los pernos de roca, mientras que con la metodología diseñada y aplicada para la presente investigación, además, es posible analizar el centrado de los pernos dentro de los “tubos simuladores” (taladros), sus acoplamientos, propiedades de los morteros con los que se instalan las barras rígidas, entre otros aspectos. Asimismo, los fabricantes y proveedores de pernos de roca, consideran que la capacidad de

anclaje de los pernos de roca tiene un comportamiento lineal con su longitud, lo cual, no se cumple como se ha demostrado tanto en las pruebas de campo (mina) como en el laboratorio, puesto que más allá de 4 pies de longitud efectiva de anclaje la curva correspondiente, se torna asintótica. La importancia de estos resultados, es que permite no sobre estimar la capacidad de anclaje de los pernos de roca, que una vez instalados pueden poner en riesgo la estabilidad de las excavaciones debido a que su real capacidad de anclaje, es menor a lo considerado; asimismo, permite y facilita a la geomecánica hacer un correcto diseño de sostenimiento.

Los resultados del estudio, son eminentemente prácticos, al permitir realizar el sostenimiento de macizos rocosos con pernos de roca, en forma segura y permanente, útil en toda industria de excavación. Análogamente, será útil para los fabricantes y proveedores de pernos de roca, como una herramienta técnica y científica para la eficiente aplicación de sus productos, para prevenir y reducir los desprendimientos de rocas. Los resultados del estudio, establecen los diámetros más apropiados (óptimos) para instalar los diferentes tipos de pernos de roca, que están plasmados en ábacos, fórmulas y tablas para facilitar su aplicación práctica, conducentes al mejor aprovechamiento de las bondades de anclaje de los pernos de roca.

### **1.3 Objetivos de la Investigación**

**1.3.1 Objetivo general.** Determinar el diámetro óptimo de taladros en el sostenimiento de macizos rocosos con pernos de roca y sus efectos ambientales.

#### **1.3.2 Objetivos específicos**

1.- Determinar la capacidad de anclaje de distintos tipos de pernos de roca, en función del diámetro de taladros.

2.- Determinar la capacidad de anclaje de los pernos de roca, en función de su longitud efectiva de anclaje (bond length) para diferentes diámetros.

3.- Analizar el acoplamiento de los pernos de roca en las paredes de los taladros y su influencia sobre su capacidad de anclaje.

4.- Reducir los efectos ambientales ocasionados por la instalación de pernos de roca en diámetros óptimos.

## 1.4 Hipótesis y Variables

**1.4.1 Hipótesis general.** El diámetro de taladros influye en el sostenimiento de macizos rocosos con pernos de roca y sus efectos ambientales.

### 1.4.2 Hipótesis específicas.

- 1.- El diámetro de taladros influye en la capacidad de anclaje de los pernos de roca.
- 2.- La capacidad de anclaje de los pernos de roca, depende de la longitud efectiva de anclaje (bond length) para diferentes diámetros.
- 3.- El acoplamiento de los pernos de roca en las paredes del taladro, influye sobre su capacidad de anclaje.
- 4.- Los diámetros óptimos de taladro, reducen los efectos ambientales ocasionados por la instalación de pernos de roca.

## 1.5 Identificación y Definición de Variables

### 1.5.1 Variables de la investigación.

#### A) *Variable Independiente (VI): Optimización del diámetro de taladros.*

Cualquier tipo y tamaño de perno de roca, se instala dentro de taladros perforados previamente, solo o en combinación con un material de acoplamiento. En cualquier caso, su capacidad de anclaje depende del diámetro de los taladros. Por consiguiente, para lograr el máximo rendimiento de los pernos de roca, es preciso instalarlos en taladros de diámetro óptimo.

**B) *Variable dependiente (VD): Sostenimiento de macizos rocosos con pernos de roca y sus efectos ambientales.*** Los pernos de roca, son los elementos de sostenimiento de mayor aplicación para la estabilización de áreas expuestas de macizos rocosos, con la finalidad de prevenir y evitar desprendimientos de rocas, tanto en ambientes subterráneos como superficiales. La capacidad de anclaje de los pernos de roca, es sensible a la magnitud del diámetro de taladros, lo cual significa que, al instalar estos elementos de sostenimiento en taladros de diámetros óptimos, se obtiene su mayor capacidad de anclaje, con la consiguiente reducción de su número por área sostenida. Al reducirse el empleo de pernos de roca, se reduce el tiempo de utilización de máquinas y mano de obra, menor consumo de insumos, desde su fabricación hasta su instalación en el terreno; en suma, se traduce en la reducción de la contaminación del aire, agua y suelo debido a las emisiones de gases, calor,

aceites, etc. a la vez también habrá menos consumo de agua y aire, recursos tan preciados para la vida sobre nuestro planeta.

**1.5.2 Operacionalización de variables.** La operacionalización de las variables, se presenta en la siguiente tabla 1.

Tabla1

*Operacionalización de Variables*

VARIABLE	DEFINICION DE LAS VARIABLES	INDICADOR	UNIDAD O CATEGORIA	TIPO
<b>Optimización del diámetro de taladros</b>	Cualquier tipo y tamaño de perno de roca, se instala dentro de taladros perforados previamente, solo o en combinación con un material de acoplamiento. En cualquier caso, su capacidad de anclaje depende del diámetro de los taladros. Por consiguiente, para lograr el máximo rendimiento de los pernos de roca, es preciso instalarlos en taladros de diámetro óptimo.	Pruebas de arranque (pull test) sobre pernos instalados en distintos diámetros de tubo simulador.	Lecturas de valores de carga en el manómetro del equipo en ton	Cuantitativa continua
		Resultado de las pruebas de arranque para cada diámetro de tubo y perno	Capacidad de anclaje de los pernos en función del diámetro de tubos en t	Cuantitativa continua
		Elongación de los pernos de roca	Lecturas en el vernier en mm	Cuantitativa continua
<b>Sostenimiento de macizos rocosos con pernos de roca y sus efectos ambientales</b>	Los pernos de roca, son los elementos de sostenimiento de mayor aplicación para la estabilización de áreas expuestas de macizos rocosos, con la finalidad de prevenir y evitar desprendimientos de rocas, tanto en ambientes subterráneos como superficiales. La capacidad de anclaje de los pernos de roca, es sensible a la magnitud del diámetro de taladros, lo cual significa que, al instalar estos elementos de sostenimiento en taladros de diámetros óptimos, se obtiene su mayor capacidad de anclaje, con la consiguiente reducción de su número por área sostenida. Al reducirse el empleo de pernos de roca, se reduce el tiempo de utilización de máquinas y mano de obra, menor consumo de insumos, desde su fabricación hasta su instalación en el terreno; en suma, se traduce en la reducción de la contaminación del aire, agua y suelo debido a las emisiones de gases, calor, aceites, etc. a la vez también habrá menos consumo de agua y aire, recursos tan preciados para la vida sobre nuestro planeta.	Pruebas de arranque con distintas longitudes efectivas de anclaje (bond length)	Lecturas de valores en el manómetro del equipo en ton	Cuantitativa continua
		Resultado de las pruebas de arranque para diferentes longitudes efectivas de anclaje	Capacidad de anclaje de los pernos en función de la longitud efectiva de anclaje en t.	Cuantitativa continua
		Consumo mensual de pernos en la minería peruana, unidades/mes	Reducción del número de pernos de roca por área sostenida	Cuantitativa continua
			Longitud de pernos de mayor consumo, unidades por mes o porcentaje	
		Reducción del tiempo de instalación de pernos de roca	Estudio de tiempos y movimientos en horas por mes	Cuantitativa continua
			Tiempos de instalación de pernos de roca con equipo manual y mecanizado	
		Reducción del consumo de agua	Consumo por equipo y Consumo mensual en m3.	Cuantitativa continua
		Reducción del consumo de aire comprimido	Consumo unitario por equipo manual y mecanizado en m3	Cuantitativa continua
			Consumo mensual en función del número de pernos utilizados, m3	
		Reducción del consumo de combustible diésel	Consumo unitario por equipo en función de su potencia, gl/HP	Cuantitativa continua
			Consumo mensual en función del número de pernos instalados, l/mes	
		Reducción del consumo de aceites hidráulicos	Consumo unitario por perno instalado, l/perno	Cuantitativa continua
			Consumo mensual en l/mes	
		Reducción de la emisión de CO2 (gas de efecto invernadero) al ambiente	Emisión de CO2 por perno instalado en kg/perno.	Cuantitativa continua
			Emisión mensual de CO2 por la demanda de pernos de roca, kg/mes	
		Reducción de emisión de aceites al ambiente	Emisión de aceites por perno instalado en l/perno	Cuantitativa continua
			Emisión mensual de aceites de acuerdo al consumo pernos en l/mes	
		Reducción de la emisión de calor al ambiente	Emisión de calor por perno instalado en kcal/perno	Cuantitativa continua
			Emisión mensual de calor en kcal/mes	

Fuente: Elaboración propia.

## 1.6 MATRIZ DE CONSISTENCIA (ver tabla 2)

Tabla 2

Matriz de Consistencia

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	VARIABLES CLASIFICACIÓN PROCESO DE OPERACIONALIZACIÓN	TIPO DE INVESTIGACION	MARCO TEORICO	HIPOTESIS CLASIFICACION	POBLACION Y MUESTRA	INSTRUMENTOS DE RECOLEC. DE DATOS
<p><b>PROBLEMA GENERAL</b></p> <p>¿Influye el diámetro de taladros en el sostenimiento de macizos rocosos con pernos de roca para reducir los impactos ambientales?</p> <p><b>PROBLEMAS ESPECIFICOS</b></p> <p>1.- ¿Cómo influye el diámetro de taladros en la capacidad de anclaje de distintos tipos de pernos de roca?</p> <p>2.- ¿Qué comportamiento tiene la capacidad de anclaje de los pernos de roca en función de su longitud efectiva de anclaje (bond length) para diferentes diámetros?</p> <p>3.- ¿Cómo influye el acoplamiento de los pernos de roca en las paredes de los taladros, sobre su capacidad de anclaje?</p> <p>4.- ¿Cómo se reducen las emisiones al ambiente, al optimizar los diámetros de los taladros para la instalación de pernos de roca?</p>	<p><b>OBJETIVO GENERAL</b></p> <p>Determinar el diámetro óptimo de taladros en el sostenimiento de macizos rocosos con pernos de roca para reducir los impactos ambientales.</p> <p><b>OBJETIVOS ESPECIFICOS</b></p> <p>1.- Determinar la capacidad de anclaje de distinto tipo de pernos de roca en función del diámetro de taladros.</p> <p>2.- Determinar la capacidad de anclaje de los pernos de roca en función de su longitud efectiva de anclaje (bond length) para diferentes diámetros</p> <p>3.- Analizar el acoplamiento de los pernos de roca en las paredes de los taladros y su influencia sobre su capacidad de anclaje.</p> <p>4.- Analizar la reducción de impactos ambientales provocados por la instalación de pernos de roca en diámetros óptimos.</p>	<p><b>Variable Independiente:</b> Optimización del diámetro de taladros.</p> <p><b>Variable dependiente:</b> Sostenimiento de macizos rocosos con pernos de roca y sus efectos ambientales.</p> <p><b>Dimensiones:</b> 1.- Determina diámetros óptimos de taladros para cada tipo de perno de roca.</p> <p>2.- Mejor aprovechamiento de los pernos de roca, al conocer su máximo capacidad anclaje.</p> <p>3.- Permite mejor distribución de los pernos de roca para un sostenimiento seguro.</p> <p>4.- Reduce los impactos ambientales.</p> <p>5.- Reduce accidentes laborales en obras civiles y mineras, al garantizar ambientes seguros de trabajo.</p> <p>6.- Reduce los daños y destrucción que ocasionan los desprendimientos de rocas.</p> <p>7.- Evita el estrés familiar y social, al tener ambientes sin desprendimiento de rocas que causan muerte y destrucción.</p> <p>8.- Reduce costos sostenimiento por mejor diseño del sostenimiento.</p> <p>9.- Reduce gastos legales y los costos por las horas dejadas de laborar por accidentes.</p> <p>10.- Coadyuva a preservar el prestigio de la empresa ante la comunidad nacional e internacional.</p> <p>11.- Propende a la mayor productividad del personal y el equipo al más bajo costo.</p> <p>12.- Reduce las emisiones de gases al ambiente.</p> <p>13.- Reduce el consumo de agua, aire, combustibles y aceites.</p>	<p>El presente trabajo de investigación es CUANTITATIVA Y EXPERIMENTAL</p> <p>Por cuanto para su desarrollo, se llevaron a cabo ensayos de laboratorio y de campo, con la finalidad de determinar los diámetros óptimos de los taladros para un sostenimiento eficiente con pernos de roca y así prevenir y evitar los desprendimientos de rocas.</p>	<p>1.- Breve tratado de medio ambiente. Clasificación. Contaminación ambiental</p> <p>2.- Impacto ambiental. Concepto de impacto ambiental. Tipología de impacto ambiental. Evaluación de impacto ambiental.</p> <p>3.- Macizos rocosos. Definición. Clasificación. Conceptos geomecánicos.</p> <p>4.- Excavaciones en macizos rocosos. Fines de las excavaciones. Métodos de excavación.</p> <p>5.- Desprendimiento de rocas. Sus causas y sus efectos</p> <p>6.- Sostenimiento de macizos rocosos. Concepto. Tipos de sostenimiento.</p> <p>7.- Pernos de roca. Principio de funcionamiento de los pernos de roca. Clasificación de pernos de roca. Materiales de acoplamiento de pernos de roca.</p> <p>8.- Placas para pernos de roca. Objetivo de las placas. Clasificación de las placas.</p> <p>9.- Rendimiento de los pernos de roca. Capacidad de anclaje. Elongación de los pernos de roca. Work index de los pernos.</p> <p>10.- Resultados de los estudios preliminares en la unidad minera Reliquias de la Cía. Minera Castrovirreyna y las pruebas de laboratorio en la Pontificia Universidad Católica del Perú.</p>	<p><b>HIPOTESIS GENERAL</b></p> <p>El diámetro de taladros influye en el sostenimiento de macizos rocosos con pernos de roca para reducir los impactos ambientales</p> <p><b>HIPOTESIS ESPECIFICOS</b></p> <p>1.- El diámetro de taladros influye en la capacidad de anclaje de los pernos de roca.</p> <p>2.- La capacidad de anclaje de los pernos de roca, depende de la longitud efectiva de anclaje (bond length) para diferentes diámetros.</p> <p>3.- El acoplamiento de los pernos de roca en las paredes del taladro, influye sobre su capacidad de anclaje.</p> <p>4.- Los desprendimientos de roca provocan impactos ambientales.</p> <p>Se trata de una HIPOTESIS ESTADISTICA CORRELACIONAL</p> <p>En el presente caso, se trata de una hipótesis de 2 VARIABLES.</p>	<p><b>Población: Pernos de roca</b></p> <p><b>Muestra:</b> 64 pernos Swellex (X-Pandabolt), 64 pernos Hydrabolt, 132 Barras Helicoidales y 64 Split Sets, es decir, 296 pernos ensayados en el laboratorio.</p> <p>Además 64 de esos mismos pernos estudiados en la mina Castrovirreyna.</p> <p>Totalizando 360 muestras.</p>	<p>Registro de lecturas de las cargas en el manómetro del equipo de arranque, en formatos exprofesamente diseñados para este fin.</p> <p>Registro de las elongaciones de los pernos durante las pruebas de arranque, en un vernier digital.</p> <p>Formatos para la recolección de recolección de información diversa relacionado con la investigación.</p> <p>Programas de cómputo para la compilación de datos e información pertinente.</p> <p>Formatos para la recolección de datos de equipos y maquinaria, como el consumo de combustibles, potencias, capacidades, etc.</p> <p>Formatos par el estudio de tiempos y movimientos en la instalación de pernos de roca</p> <p>Estudio de la demanda de pernos por la minería peruana</p> <p>Registros de demandas de combustibles y aceites por los equipos</p> <p>Análisis de las emisiones de CO2, aceites, calor, etc. por los equipos de empernado.</p>

Fuente: Elaboración propia.



## **Capítulo 2**

### **Marco Teórico**

Este capítulo empieza con un tratado respecto al medio ambiente y su clasificación, así como los conceptos y significados de la contaminación e impacto ambiental. Seguidamente y como parte del ambiente se toca lo referente a los macizos rocosos y su clasificación, excavaciones en roca, su fines y métodos de excavación y, desprendimientos de rocas y los daños que ocasionan. Seguidamente, se trata sobre el sostenimiento de macizos rocosos y elementos de sostenimiento. Finalmente, se trata sobre pernos de roca, su clasificación, medición de su capacidad de anclaje y resultados en la Mina Castrovirreyna.

Siendo los pernos de roca, los elementos de sostenimiento de mayor aplicación en el sostenimiento de macizos rocosos, es importante determinar la reducción de su demanda al optimizar los diámetros de los taladros en los que se instalan, puesto que en este proceso se emplean equipos, materiales y personal. El funcionamiento de los equipos para perforar taladros e instalar los pernos, consume combustibles fósiles, aceites, aire, agua, entre otros, donde los combustibles se convierten en gases y los aceites son emitidos en forma de neblina al aire luego de accionar los equipos. El aire se toma del ambiente para su compresión (como energía neumática) y ventilación acorde con la cantidad de máquinas y personal en interior mina, lo mismo ocurre con el agua que es tomada de la naturaleza como agente de barrido en las perforaciones, que luego de utilizarlo se descarga a la naturaleza contaminado con partículas de mineral y roca (lodo).

Es ampliamente conocido que, el funcionamiento de equipos diésel producen emisiones de gases como el dióxido de carbono además de otros nocivos para el ambiente, a ello se suma la emisión de aceites en forma de neblina por las perforadoras sobre todo manuales y grandes cantidades de calor que contribuye al calentamiento global. Por consiguiente, al reducir el uso de pernos de roca, en el presente caso optimizando los

diámetros de taladros, se reducen las emisiones y el empleo de aire y agua (tomados de la naturaleza).

Por otro lado, el objetivo fundamental del sostenimiento de macizos rocosos en las excavaciones, es evitar los desprendimientos de rocas, que muchas de las veces causan daños materiales y personales. Sólo en la minería peruana, más del 30 % de los accidentes mortales son ocasionados por este fenómeno, como reporta Ministerio de Energía y Minas (MINEM). Analizando las estadísticas del MINEM, se determina que el 87 % de los accidentes mortales por desprendimiento de rocas se producen en las rocas clase III (A y B) y IV (A y B), de los cuales, el 53 % corresponden en suma a las clases IIIB y IVA. Asimismo, el 59 % de los accidentes ocurren en los tajeos (labores que normalmente no se sostienen) y el 28 % en las galerías. Según ocupación del personal, el 53 % de los accidentes mortales sufren los perforistas y sus ayudantes. Según tipo de sostenimiento, el 64,7 % de los accidentes mortales ocurrieron en zonas sostenidas con Split Sets o madera, de los cuales, 32,7 % corresponden a Split Sets (Giraldo, 2016).

Existe información limitada de los impactos ambientales que ocasionan los desprendimientos de rocas, tanto en ambientes superficiales como subterráneos, a pesar de su incidencia como se demuestra más adelante. Los reportes y estadísticas que existen, están enfocados a los accidentes mortales que ocasionan los desprendimientos de rocas en la minería subterránea, los desprendimientos de roca que no ocasionan accidentes mortales no son reportados, a pesar de ocasionar indirectamente daños al medio ambiente. En ambientes superficiales, la ocurrencia de desprendimientos de roca se reporta por los daños que causan a infraestructuras, a centros poblados causando muerte y destrucción, pero no los o daños ambientales que ocasionan.

## **2.1 El Medio Ambiente**

“El medio ambiente es un sistema formado por elementos naturales y artificiales que están interrelacionados y que son modificados por la acción humana. Se trata del entorno que condiciona la forma de vida de la sociedad y que incluye valores naturales, sociales y culturales que existen en un lugar y momento determinado. Los seres vivos, el suelo, el agua, el aire, los objetos físicos fabricados por el hombre y los elementos simbólicos (como las tradiciones, por ejemplo) componen el medio ambiente. La conservación de éste es imprescindible para la vida sostenible de las generaciones actuales y de las venideras. Podría decirse que el medio ambiente incluye factores físicos (como el clima y la geología),

biológicos (la población humana, la flora, la fauna, el agua) y socioeconómicos (la actividad laboral, la urbanización, los conflictos sociales)” (Perez y Gardey, 2009).

El medio ambiente es el conjunto de factores físico-naturales, sociales, culturales, económicos y estéticos que interactúan entre sí, con el individuo y la comunidad en que vive, determinando su forma, carácter, relación y supervivencia. El medio ambiente lo determinan un conjunto de variables de estado, capaces de ser medidos y valoradas su calidad. Según la Comunidad Europea, el medio ambiente es la combinación de elementos cuyas complejas interrelaciones constituyen el marco, el entorno y las condiciones de vida del individuo y la sociedad, tal como son o tal como se perciben (Conesa, 2010).

Actualmente, ya es un hecho el avance de la colonización subterránea, como una expansión urbana del futuro, como tal, será un ambiente más confortable y llevadera para los seres humanos y la vida en general, por la falta de espacio en las grandes urbes, la radiación ultra violeta, tormentas eólicas y las temperaturas extremas. Existe una amplia gama de excavaciones con distintos fines, que en conjunto han contribuido para dar seguridad, tranquilidad y bienestar al hombre. Existen muchos casos de ciudades subterráneas, servicios, centros comerciales que se pueden citar (RT, 2014).

### 2.1.1 Clasificación del medio ambiente

**A) Ambiente físico.** Elementos materiales que constituyen el entorno del medio ambiente incluyendo los artificiales, como Corteza terrestre, macizo rocoso, agua, clima, contaminación, edificaciones, obras civiles, entre otros. Como ejemplo se puede apreciar la figura 1, que corresponde al paisaje de las lagunas de Llanganuco (Yungay), donde se aprecia un típico valle glaciar, lagunas (agua), macizos rocosos, nevados, cerros, morrenas, carretera, etc.

**B) Ambiente biológico.** El **ambiente** físico y **biológico** es la matriz espacial en donde se desenvuelve todo el contexto socio-cultural. Ecosistema: interdependencia funcional entre el **medio ambiente** y la cultura. Las variaciones o cambios que ocurren en los elementos que componen el ecosistema afectan las condiciones de salud de la población. Como ejemplo de ambiente biológico se pueden citar, Población huma, flora, fauna, entre otros (Prezi, 2014). Como ejemplo del ambiente biológico, se puede observar la flora y fauna de Tarapoto (San Martín – Perú), que ilustra la figura 2.



*Figura 1. Llanganuco como Ejemplo de Ambiente Físico.*

Fuente: Elaboración propia.



*Figura 2. La Flora y Fauna en la Selva de Tarapoto.*

Fuente: Elaboración propia

c) ***Ambiente Socio – económico.*** Durante el proceso de constructivo de obras civiles o mineras, toda excavación es un centro laboral. Como tal, el personal está expuesto a riesgos de accidentes y contaminantes que se generan durante el trabajo, como ilustran las figuras 3 (a) y (b). Además, se puede destacar que todas las excavaciones subterráneas de uso civil, durante su proceso constructivo constituyen centros laborales, que luego de culminado podrá convertirse en otro tipo de actividad económica caso de los centros

comerciales, estaciones subterráneas, o simplemente de servicio o comunicación sin la presencia de vida durante su funcionamiento, caso de los túneles de aducción, chimeneas, piques, tubería forzada (penstock), entre otros. En minería, las excavaciones constituyen permanentemente un centro laboral con todos los riesgos que ello implica, como desprendimiento de rocas, gaseamiento, etc. Dentro de este tipo de excavaciones tenemos los tajos, pozos de drenaje, galerías, rampas, entre otros.



(a)



(b)

*Figura 3. Excavaciones subterráneas como centro laboral. (a) Tajo minero. (b) Aplicación de concreto lanzado (shotcrete) en un túnel.*

Fuente: Recuperado de (a) <https://www.tynmagazine.com/chile-busca-impulsar-uso-de-tecnologias-digitales-en-mineria/> y (b) <http://www.teurcontratistas.com/servicios/shotcrete/shotcrete-con-fibra-metalica-en-talud>

La figura 4, ilustra la ciudad Imperial del Cusco como un ambiente socio – económico, donde los hombres desarrollan todas las actividades comerciales, culturales, políticas, empresariales, laborales, entre otros, para su supervivencia.

La Ingeniería Ambiental, es una rama de la ingeniería que estudia los problemas ambientales en forma científica e integrada, teniendo en cuenta sus dimensiones científicas, químicas, físicas, ecológicas, biológicas, geológicas, sociales, económicas y tecnológicas a fin de promover un desarrollo sostenible. El ingeniero ambiental reconoce, interpreta y diagnostica los impactos ambientales positivos y negativos, evalúa el nivel de daño ocasionado en el ambiente y propone soluciones integradas de acuerdo a las leyes medioambientales vigentes. Asimismo, el ingeniero ambiental debe estar capacitado para: Planificar el uso sostenible del ambiente, proponer políticas medioambientales, elaborar estudio de impacto ambiental, gestión ambiental, medidas de mitigación y control de procesos contaminantes, diagnosticar y evaluar aspectos ambientales, elaborar soluciones



medioambientales, fiscalizar procesos medioambientales, monitorear recursos naturales y proponer soluciones o administrar instalaciones de carácter ambiental (Ingeniería ambiental, s.f.).



*Figura 4. Ciudad de Cusco como Ejemplo de Ambiente Socio - Económico*

Fuente: Elaboración propia

**2.1.2 Contaminación ambiental.** La contaminación ambiental, es la presencia de cualquier agente extraño en el ambiente, sea éste, físico, químico o biológico; también la combinación de estos agentes en diferentes formas y concentraciones, que pueden ser dañinos para la salud, seguridad o el bienestar de la población; también pueden ser perjudiciales para la flora y la fauna y alterar el normal desarrollo de la actividad humana. La contaminación ambiental es también, la introducción de cuerpos receptores de sustancias sólida, líquida o gaseosa o la mezcla de ellas que alteran en forma negativa las condiciones naturales preexistentes, que pueden afectar la vida y la salud del hombre o alterar el ecosistema. Actualmente, es uno de los problemas que agobia a nuestro planeta, por el desequilibrio que genera para la existencia de la vida por el exceso de contaminantes que sobrepasan los niveles tolerables en la naturaleza. La contaminación puede presentarse por causas naturales por la misma actividad geológica de la tierra (tectonismo, vulcanismo, terremotos, etc.) o provocado por el hombre (construcciones, minería, agricultura, guerras, actividad petrolera, industria en general, etc.) (ispch, 2009).

Los problemas de deterioro ambiental tienen carácter global, ningún pueblo o país está exento de ellos, como tal, ha conducido a la contaminación, agotamiento de los recursos naturales, pérdida de la biodiversidad. La contaminación tiene diversos orígenes, agentes contaminantes, ingresos al cuerpo y grados de afectación. El origen de los contaminantes puede ser natural (microorganismos, metales, nitratos, entre otros) o sintético (insecticidas, plásticos, detergentes, etc.). Los agentes contaminantes son: biológicos (virus, bacterias, hongos, parásitos, etc.), físicos (calor, ruido, radiaciones, ondas, etc.) y químicos (efluentes, gases, hidrocarburos, etc.). Los contaminantes ingresan al cuerpo del hombre y animales por: inhalación (gases, humos, vapores, partículas cuyo tamaño es inferior a las 10 micras, etc.); vía cutánea (sustancias liposolubles): oral (se ingiere en los alimentos). Los grados de afectación que ocasiona la contaminación (ligera y graves) (Avila , 2016).

Con el rápido desarrollo de la ciencia y tecnología, con los nuevos procesos industriales y productos sintéticos que vienen desarrollándose en forma constante, más y más contaminantes están siendo generados y emitidos al ambiente. El número de tales contaminantes y sus concentraciones en el ambiente ha entrado a una nueva fase en la última década. El análisis ambiental hoy, como cualquier otro campo científico depende en gran medida de la instrumentación. Los contaminantes orgánicos se determinan principalmente por los métodos de cromatografía de gases, cromatografía de gas/espectrometría de masas (GC/MS), y cromatografía líquida de alto rendimiento. Estas técnicas tampoco son adecuadas para medir varias clases de los denominados contaminantes emergentes. El campo de la espectrometría, por lo tanto, se ha ampliado desde la etapa de baja resolución a la de alta resolución y desde el impacto de electrón al modo de ionización electrospray para detectar y cuantificar contaminantes en concentraciones mucho más bajas. Nuevos métodos se están desarrollando incluyendo cromatografía líquida / espectrometría de masas para medir contaminantes de grandes masas moleculares que no se pueden determinar por GC/MS (Pradyot, 2010).

**2.1.3 Impacto ambiental.** El impacto ambiental es el efecto que produce la actividad humana sobre el medio ambiente. El concepto puede extenderse a los efectos de un fenómeno natural catastrófico. Es la alteración de la línea de base ambiental. Los tipos de impacto ambiental son: a) Impacto ambiental al nivel mundial, la mayor parte relacionada con el uso de combustibles fósiles y el derrame de petróleo en los océanos, mares, lagos y ríos; producen contaminación ambiental dañando la flora y la fauna. A ello se suma los

residuos radioactivos provenientes de las reacciones nucleares aplicados para la generación de energía. Asimismo, la explotación minera y el procesamiento de minerales hasta la obtención del metal, producen impactos ambientales contra el aire, suelos, agua, la fauna y la flora y la salud. b) Impactos ambientales de las guerras y el uso bélico del uranio empobrecido, las guerras modernas utilizan bombas cuya explosión genera temperaturas que sobre pasan los 1000 °C, que arrasan infraestructuras, flora, fauna y vidas humanas; lo peor, alteran la composición de los suelos, cuya regeneración demanda cientos de años. c) Impactos sobre el medio social, contribuyen a distintas dimensiones de la existencia humana como: efectos económicos, socioculturales, efectos tecnológicos, efectos sobre la salud e impactos sobre el medio social local. d) Impactos sobre el sector productivo, la degradación del medio ambiente incide en la competitividad del sector productivo por falta de calidad intrínseca en la cadena productiva, mayores costos por la remediación de ambientes contaminados y efectos sobre la productividad (Impacto ambiental, s.f.).

Se dice que hay impacto ambiental, cuando un proyecto o actividad produce una alteración favorable o desfavorable en el medio o en alguno sus componentes. Es decir, el término impacto no necesariamente significa negatividad. La evaluación del impacto ambiental, es un procedimiento jurídico-administrativo que tiene por objetivo la identificación, predicción e interpretación de los impactos ambientales que podrían producir los proyectos de ingeniería o cualquier actividad humana, así como los fenómenos naturales (Conesa, 2010).

La evaluación del impacto ambiental (EIA), es un proceso formal empleado para predecir las consecuencias ambientales de un proyecto o decisión legislativa, la implantación de políticas y programas, o la puesta en marcha de proyectos de desarrollo. Comprende una serie de pasos: a) Examen previo, b) Estudio preliminar, c) Determinación de su alcance y d) Estudio en sí, investigación para predecir y evaluar el impacto. El estudio de impacto ambiental, es un estudio técnico multidisciplinario, incorporado en la evaluación de impacto ambiental, cuyo objetivo es predecir, identificar, valorar y corregir los impactos ambientales que puedan causar los diferentes factores o fenómenos que ocurren en el medio ambiente (Impacto ambiental, s.f.).

La tipología de los impactos ambientales no debe ser incluyente ni excluyente, dado que un impacto concreto puede pertenecer a la vez a dos o más grupos tipológicos, así se tiene: a) Por la evolución de la calidad ambiental del medio, impacto positivo o negativo. b) Por la intensidad o grado de incidencia en el medio, los impactos pueden ser notables,



mínimo o bajo, medio y alto y, umbral. c) Por extensión, los impactos por esta tipología pueden ser: puntual, parcial, extenso, total y ubicación crítica. d) Por el momento en que se manifiesta, impacto latente, inmediato y de momento crítico. e) Por su persistencia o duración, los impactos pueden ser temporales o permanentes. f) Por su capacidad de recuperación, impacto irreversible, reversible, recuperable o irrecuperable. g) Por la relación causa-efecto, impacto directo, indirecto o secundario. h) Por la interrelación de acciones y/o efectos (acumulación de energía), impacto acumulativo o sinérgico. i) Por su periodicidad, continuo y discontinuo. j) Por la necesidad de aplicación de medidas correctivas, impacto ambiental crítico, severo, moderado y compatible (Conesa, 2010).

Los métodos de análisis de la evaluación del impacto ambiental, están destinados a medir tanto los impactos directos como la acumulación de impactos ambientales y la inducción de riesgos potenciales. Los métodos seleccionados deben cumplir con los siguientes requisitos: a) Deben ser adecuados para realizar las tareas de identificación de los impactos. b) Deben ser suficientemente independientes de los puntos de vista personales del equipo evaluador. c) Ser económicos en costos y requerimiento de datos, tiempo de aplicación, cantidad y tiempo del personal, equipo e instalaciones. Los métodos más comunes utilizados para identificar los impactos ambientales son: listas de chequeo, diagramas de flujo y redes, superposiciones cartográficas y sistemas de información geográfica, matrices, método Batelle-Columbus, paneles de expertos y guías metodológicas (UNED, 2014).

## **2.2 Macizos Rocosos**

**2.2.1 Definición.** Macizo rocoso, es una sección de la corteza terrestre, demarcada por fallas o fisuras. En el movimiento de la corteza, un macizo tiende a retener su estructura interna al ser desplazado en su totalidad. El término es usado también para referirse a un grupo de montañas formadas por tal estructura. El macizo rocoso es una unidad estructural de la corteza terrestre, de menor extensión que las placas tectónicas (Macizo, s.f.).

**2.2.2 Clasificación.** La necesidad de contar con sistema de clasificación de un macizo rocoso, es porque posibilita diseñar entre otros aspectos, el sostenimiento de la roca remanente en las excavaciones. Los sistemas de clasificación de los macizos rocosos se agrupan en dos grupos: Clasificación de Ingeniería (Terzaghi, Lauffer, Deere y Wickham) y

clasificación geomecánica (Bieniawski y Barton) (Singh & Goel, 1999). En la minería peruana se utilizan las clasificaciones geomecánicas de Bieniawski (RMR) y Barton (Q).

#### ***A) Objetivos de la clasificación:***

- Tener conocimiento de la calidad del macizo rocoso para el diseño y construcción de estructuras de ingeniería tanto en obras civiles como en minería, sean estas superficiales o subterráneas.
- Adoptar una o más clasificaciones de macizos rocosos, para establecer el tiempo de autosostento del terreno a fin de aplicar oportunamente los elementos de sostenimiento más apropiados y adecuadamente dimensionados.
- Prevenir desastres y accidentes por corrimientos o desprendimientos de rocas durante y después de la construcción de una estructura en un macizo rocoso (Abril, 2007).

#### ***B) Clasificación de ingeniería***

*i) Clasificación de Terzaghi (1946).* La primera referencia para el uso de la clasificación del macizo rocoso para el diseño del sostenimiento de túneles, está en el artículo de Terzaghi (1946), donde los soportes de roca con arcos de acero son estimados en base a una clasificación descriptiva. Terzaghi presta atención al diseño del sostenimiento, teniendo en cuenta el comportamiento del macizo rocoso, particularmente en situaciones donde la gravedad constituye la fuerza dominante. Las definiciones claras y concisas y los comentarios prácticos de estas descripciones dan buena referencia de la ingeniería geológica, muy usual para diseños de ingeniería.

Terzaghi definió las siguientes descripciones para túneles: a) Roca intacta, no tiene fisuras ni fracturas. b) Roca estratificada, consta de estratos individuales con o sin resistencia a la separación entre ellos. c) Roca medianamente fisurada, contiene juntas y grietas, pero los bloques entre las juntas están soldados o muy íntimamente enlazados. d) Roca agrietada en bloques, químicamente inalterada o casi inalterada. e) Roca triturada, pero químicamente sana. f) Roca comprimida, avanza lentamente en el túnel sin aumento perceptible de volumen. g) Roca expansiva, avanza básicamente en el túnel debido a su propia expansión (Hoek & Brown, 1985).

*ii) Clasificación de Lauffer (1958).* Lauffer propuso el tiempo de auto sostenimiento para un claro activo que está relacionado a la calidad del macizo rocoso, por donde corre la excavación. En un túnel, el claro sin sostenimiento, es definido como la

distancia entre el frente y el soporte más próximo. La clasificación original de Lauffer ha sido modificada por varios autores, entre otros, Patcher et al (1974) que ahora forma parte del enfoque general de tunelería conocido como el Nuevo Método Austriaco de tunelería (New Austrian Tunneling Method, NATM) (Cáceres, 2002).

El significado del concepto del tiempo de sostenimiento, es que un incremento en el claro del túnel conlleva a una reducción significativa en el tiempo disponible para la instalación del sostenimiento. El NATM incluye un número de técnicas para el tuneleo seguro, en condiciones de roca en la que el tiempo de sostenimiento es limitado, antes que la falla ocurra. Estas técnicas incluyen el uso de pequeña sección superior y banqueo o el uso de múltiples secciones para formar un anillo de reforzamiento dentro del cual el túnel puede ser excavado en forma segura. Estas técnicas son aplicables en rocas sueltas tal como lutitas, fillitas y lodolita, donde los problemas de compresión y expansión descritos por Terzaghi, son propensos a ocurrir (Giraldo, 2010).

### *iii) Clasificación de Deere y otros (1967)*

El índice de la calidad de roca (Rock Quality Designation Index, RQD), fue desarrollado por Deere et al. (1964), para proporcionar una estimación cuantitativa de la calidad del macizo rocoso a partir de los testigos de perforación. El RQD, es definido como el porcentaje de la suma de longitud de los testigos con más de 10 cm de longitud entre la longitud total. Los testigos tienen 54,7 mm de diámetro y pueden ser perforados con tubería de doble tubo.

Palmström (1982), sugirió que cuando no se dispone de testigos, pero están visibles las trazas de las discontinuidades en las superficies expuestas en las galerías de exploración; el RQD puede estimarse del número de discontinuidades por unidad de volumen. La relación propuesta para macizos rocosos exentos de arcilla es:  $RQD = 115 - 3,3 J_v$ ; Donde:  $J_v$  = Suma del número de juntas por unidad de longitud para cada discontinuidad, conocida como la cantidad volumétrica de juntas. El RQD de Deere, ha sido ampliamente usado sobre todo en USA después de su introducción (Hoek & Brown, 1985), cuya relación del RQD con la calidad de roca es la siguiente:

<b>RQD</b>	<b>Calidad de roca</b>
< 25 %	Muy mala
25 – 50 %	Mala
50 – 75 %	Regular
75 – 90 %	Buena
90 – 100 %	Muy buena

**C) Clasificación Geomecánica.** No se requiere análisis para prever que un túnel insuficientemente sostenido en roca mala caerá solo. Saber cuánto tiempo pueden permanecer las excavaciones sin sostenimiento, que permita a Ingeniería y contratista seleccionar un adecuado sostenimiento y la profundidad de la perforación por avance, constituyen parámetros decisivos en el proceso de excavación. Aunque todavía no existe un método racional totalmente satisfactorio para determinar el tiempo de falla - “tiempo de autosostento” - del tramo de roca no sostenida, un número de ingenieros han desarrollado un criterio de ingeniería en este asunto a través de correlaciones con la clasificación de la roca. Lauffer reconoció que el tiempo de auto soporte depende de la condición de roca y el tramo activo, este último definido como el mínimo tramo de túnel sin sostenimiento adyacente al frente. La tabla de Lauffer relacionada con el registro del tramo activo para el tiempo autosostento fue ajustado por Bieniawski (1976) en términos de la clasificación geomecánica (Goodman, 1980).

*i) Clasificación geomecánica RMR de Bieniawski.* Bieniawski (1973) publicó los detalles de su primera clasificación del macizo rocoso denominado “clasificación geomecánica” o sistema RMR (Rock Mass Rating), con el transcurso de los años ha sido sucesivamente perfeccionado a medida que más casos fueron analizados. Bieniawski, realizó cambios significativos en las valoraciones asignadas a los diferentes parámetros. Todas las versiones de RMR (1973 - 1989), están relacionadas con la estimación de resistencia del macizo rocoso. El RMR toma en cuenta los siguientes 6 parámetros: 1) Resistencia a la compresión uniaxial de la roca. 2) Índice de la calidad de roca (RQD). 3) Separación de las fisuras. 4) Estado de las fisuras. 5) Infiltraciones de agua subterránea. 6) Orientación de las discontinuidades (Hoek, 2006).

Para aplicar este sistema de clasificación, el macizo rocoso es dividido en un número de regiones estructurales y clasificadas por separado. Los límites de las regiones estructurales normalmente coinciden con la estructura principal como una falla o con el cambio del tipo de roca. La tabla 3, presenta las valoraciones para cada uno de los 6 parámetros indicados, con cuya suma se obtiene el valor del RMR. Bieniawski (1989) publicó unas guías para seleccionar el soporte en túneles en roca, conociendo el valor del RMR; guías que se presentan en la tabla 4. Cabe destacar que, éstas fueron elaboradas para túneles de 10 m de ancho en “herradura”, excavado con perforación y voladura (P&V), en un macizo rocoso sometido a un esfuerzo vertical  $< 25$  MPa (equivalente a una profundidad bajo la superficie de  $< 900$  m).

ii) *RMR para Minería (MRMR)*. El sistema Rock Mass Rating (RMR) de Bieniawski estuvo originalmente basado sobre casos históricos registrados por ingeniería Civil. La industria minera, tendió a considerar esta clasificación como algo conservador y se hicieron muchas modificaciones para hacerla más relevante para aplicaciones mineras (Hoek, Kaiser, & Bawdens, Visualization of rock mass classification systems, 2006). Un resumen explicativo de estas modificaciones fue completado por Bieniawski en 1998.

Laubscher (1977, 1984), Laubscher y Taylor (1976), Laubscher y Page (1990) formularon un sistema modificado del RMR para minería (MRMR, Modified Rock Mass Rating). El MRMR toma como valor base el RMR, para luego ajustarlo para cuantificar in situ los esfuerzos inducidos, los cambios de esfuerzos y los efectos de la voladura y alteración. Una serie de recomendaciones de soporte están asociadas con los valores resultantes del MRMR. Para aplicar el sistema MRMR de Laubscher se debe tener en cuenta que muchos casos históricos sobre el cual se basa, fueron derivados de operaciones por hundimiento. Originalmente, el Block Caving en las minas de asbesto en África formó la base para las modificaciones, pero consecuentemente, otros casos históricos de alrededor del mundo han sido adicionados a la base de datos.

Tabla3

Determinación del RMR y Clasificación del Macizo Rocosó

A. CLASIFICACIÓN DE LOS PARAMETROS Y SU CALIFICACIÓN									
PARAMETROS			ESCALA DE VALORES						
	Resistencia de la roca intacta	Índice de resistencia a la carga puntual (MPa)	> 10	4 - 10	2 - 4	1 - 2	Para valores bajo este rango es preferible la Compresión uniaxial		
		Resistencia a la compresión uniaxial (MPa)	> 250	100 - 250	50 - 100	25 - 50	-25	-5	1
	CALIFICACION (Rating)		15	12	7	4			
	Calidad de núcleos RQD (%)		90 - 100	75 - 90	50 - 75	25 - 50	< 25		
	CALIFICACION (Rating)		20	17	13	8	3		
	Separación de fisuras (m)		> 2	0,6 - 2	0,2 - 0,6	0,06 - 0,2	< 0,06		
	CALIFICACION (Rating)		20	15	10	8	5		
	ESTADO DE LAS FISURAS (ver E)		Superficies muy rugosas, sin continuidad, sin separación. Paredes de roca inalterada	Superficies algo rugosas, separación < 1 mm, paredes ligeramente alteradas	Superficies ligeramente rugosas. Separación < 1 mm, paredes de roca suave	Superficies pulidas o relleno < 5 mm, espesor o separación 1 - 5 mm fisuras continuas	Relleno blando > 5 mm de espesor o fisuras abiertas > 5 mm, fisuras continuas		
	CALIFICACION (Rating)		25	20	12	6	0		
	AGUA SUBTERRÁNEA	Afluencia por 10 m de túnel (l/min)	Nada	< 10	10 - 25	25 - 125	> 125		
		Presión de agua en la fisura / Mayor esfuerzo principal ( $\sigma$ )	0	< 0,1	0,1 - 0,2	0,2 - 0,5	> 0,5		
		Condición general	Completamente seco	Húmedo	Mojado	Empapado (goteo)	flujo continuo		
	CALIFICACION (Rating)		15	10	7	4	0		

Tabla 3  
Determinación del RMR y Clasificación del Macizo Rocosó (Cont.)

<b>B. AJUSTE DE LA CALIFICACIÓN POR LA ORIENTACION DE LAS FISURAS (Ver F)</b>						
RUMBO Y BUZAMIENTO DE LAS FISURAS		Muy favorable	Favorable	Regular	Desfavor.	Muy desfavorable
CALIFICACIONES (Ratings)	Túneles y minas	0	-2	-5	-10	-12
	Cimentaciones	0	-2	-7	-15	-25
	TALUDES	0	-5	-25	-50	-60
<b>C. CLASIFICACIÓN DEL MACIZO ROCOSO SEGÚN LA CALIFICACIÓN TOTAL (RMR)</b>						
RMR = CALIFICACIÓN TOTAL (Rating)		100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 21
NUMERO DE CLASE		I	II	III	IV	V
DESCRIPCIÓN		Roca muy buena	Buena roca	Roca regular	Roca mala	Roca muy mala
<b>D. SIGNIFICADO DE LAS CLASES DE MACIZO ROCOSO</b>						
NUMERO DE CLASE		I	II	III	IV	V
TIEMPO PROMEDIO DE SOSTENIMIENTO		20 años para claro de 15 m	1 año para claro de 10 m.	1 semana para claro de 5 m.	10 horas para claro de 2,5 m.	30 minutos para claro de 1 m.
Cohesión del macizo rocoso (kPa)		> 400	300 - 400	200 - 300	100 - 200	< 100
Angulo de fricción del macizo rocoso		> 45°	35° - 45°	25° - 35°	15° - 25°	< 15°
<b>E. PAUTAS PARA LA CLASIFICACION DE LAS CONDICIONES DE DISCONTINUIDAD</b>						
Longitud de discontinuidad (persistencia)		< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m
Calificación		6	4	2	1	0
Separación (apertura)		Nada	< 0,1 mm	0,1-1,0 mm	1 - 5 mm	> 5 mm
Calificación		6	5	4	1	0
Rugosidad		Muy rugoso	Rugoso	Ligeramente rugoso	suave	Superficie pulida
Calificación		6	5	3	1	0
Relleno		Nada	Relleno duro < 5 mm	Relleno duro > 5 mm	Relleno Blando < 5 mm	Relleno blando > 5 mm.
Calificación		6	4	2	2	0
Alteración		Intacto	Ligeramente alterado	Moderadamente alterado	Muy alterado	Descompuesto
Calificación		6	5	3	1	0
<b>F. EFECTO DEL RUMBO Y BUZAMIENTO DE LA DISCONTINUIDAD EN TUNELEO</b>						
Rumbo perpendicular al eje del túnel			Rumbo paralelo al eje del túnel			
Corrida con buzamiento - Buzamiento 45° - 90°			Corrida con buzamiento 20° 45°			
Muy favorable			Favorable			
Corrida contra el buzamiento - Buz. 54° - 90°			Buzamiento 45 - 90°			Buz. 20° - 45°
Regular			Muy desfavorable			Regular
Corrida contra el buzamiento - Buz. 54° - 90°			Corrida contra el buzamiento 20° - 45°			
Regular			Buzamiento 0° - 20° independientemente del rumbo			
			Desfavorable			Regular

Fuente: Hoek et al. (2002)

Tabla4

Selección del Método de Excavación y Sostenimiento a Partir del RMR (Bieniawski, 1989)

CLASE DE MACIZO ROCOSO		RMR	EXCAVACIÓN			PERNOS DE ANCLAJE (20 mm de diámetro, completamente cementado)	Concreto lanzado (Shotcrete)	ARCOS DE ACERO
NUM	DESCRIP		Método	Avance (m)	Soporte			
II	Roca muy buena	81-100	Sección completa.	3,0	Nada	Generalmente no requiere soporte excepto empernado puntual		
III	roca buena	61 - 80	Sección completa.	1,5	Soporte terminado a 20 m del frente	Localmente, pernos de 3 m en la corona, espaciado 2,5 m malla metálica ocasional.	50 mm en la corona donde es requerido	Nada
III	Roca regular	41 - 60	Sección superior y banqueo.	1,5 - 3,0 en la sección superior	Soporte temporal después de cada disparo. Soporte terminado a 10 m del frente	Pernos sistemáticos de 4 m, espaciado 1,5 - 2,0 m en la corona y paredes, con malla metálica en la corona.	50 - 100 mm en la corona y 30 mm en los hastiales (lados)	Nada
IV	Roca mala	21 - 40	Sección superior y banqueo.	1,0 - 1,5 en la sección superior	Colocar soporte simultáneamente con la excavación, 10 m del frente.	Pernos sistemáticos de 4 - 5 m, espaciados 1,0 - 1,5 m en la corona y paredes, con malla metálica en la corona.	100 - 150 mm en la corona y 100 mm en los hastiales	Arcos de acero ligeros a medianos espaciados 1,5 m donde es necesario.
V	Roca muy mala	< 20	Múltiples secciones.	1,0 - 1,5 en la sección superior	Colocar soporte simultáneamente con la excavación. Aplicar shotcrete tan pronto como sea posible después de la voladura.	Pernos sistemáticos de 5 - 6 m, espaciados 1,0 - 1,5 m en la corona y paredes, con malla metálica en el piso.	150 - 200 mm en la corona, 150 mm en los hastiales en los hastiales y 50 mm en el frente.	Arcos de acero mediano y robustos espaciados 0,75 m con revestimiento de acero y enrejado con vigas de acero (forepolin). Piso cerrado.

Fuente: Hoek et al. 2002

Cummins y otros (1982), y Kendorski y otros (1983) modificaron también la clasificación RMR de Bieniawski, para formular el MBR (Modified Basic RMR) para minería. Este sistema fue desarrollado para operaciones Block Caving en USA. Esto involucra el uso valoraciones diferentes para los parámetros originales usados para determinar el valor de RMR y el ajuste del valor resultante del MBR para tener en cuenta los



daños producidos por la voladura, esfuerzos inducidos, características estructurales, distancia del frente del hundimiento y el tamaño del block caving (Hoek, 2006).

iii) *Indice de la Calidad de Túneles (Q)*. Barton, Lien y Lunde (1974), del Instituto de Geotecnia de Noruega (Norwegian Geotechnical Institute, NGI) basado en gran cantidad de casos de tipos de estabilidad en excavaciones subterráneas, propusieron el INDICE DE CALIDAD DE TUNELES (Q), para determinar las características del macizo rocoso y requerimiento de sostenimiento en túneles.

El valor numérico de Q varía en una escala logarítmica de 0,001 a un máximo de 1000 (Palmström & Broch, 2006).

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$$

Donde:

RQD	=	Índice de calidad de la roca de Deere.
J <sub>n</sub>	=	Número de sistemas de fisuras (Joint set number)
J <sub>r</sub>	=	Número de rugosidad de las fisuras (Joint roughness number).
J <sub>a</sub>	=	Número de alteración de las fisuras (Joint alteration number).
J <sub>w</sub>	=	Factor de reducción por la presencia de agua en las fisuras (Joint water reduction factor), y
SRF	=	Factor de reducción por esfuerzos (stress reduction factor).

La explicación de Barton y otros sobre el significado de los parámetros usados para determinar el valor de Q, es:

a) El primer cociente (RQD/J<sub>a</sub>), representa a la estructura del macizo rocoso. Es una medida rudimentaria del tamaño de los bloques o de las partículas, con 2 valores extremos (100/0,5 y 10/20), difiriendo por un factor de 400. Si el cociente es interpretado en centímetros, los extremos “tamaño de fragmento” de 200 a 0,5 cm son vistos como rudimentarias, pero aproximaciones bastante realistas.

b) El Segundo cociente (J<sub>r</sub>/J<sub>a</sub>), representa a la rugosidad y las características de fricción de las paredes de las fisuras o materiales de relleno. El valor favorable de este cociente será cuando las juntas rugosas e inalteradas se encuentran en contacto directo, es decir, las superficies están próximos a la resistencia óptima, que tenderán a dilatarse fuertemente cuando estén sometidos a esfuerzos cortantes y que por lo tanto muy favorables a la estabilidad del túnel.

Cuando las fisuras tienen recubrimientos y rellenos arcillosos delgados, se reduce sustancialmente la Resistencia. Sin embargo, el contacto con las paredes después de un ligero desplazamiento por el esfuerzo cortante puede ser muy importante y puede evitar el colapso. Donde no existe contacto de paredes, la situación para la estabilidad de un túnel se ve seriamente comprometida.

c) El tercer cociente ( $J_w/SRF$ ), consta de 2 parámetros de esfuerzos. SRF es una medida de: 1) La carga que se disipa en el caso de una excavación dentro de una zona de fallas y de roca englobada en arcilla; 2) los esfuerzos en una roca competente; y 3) las cargas compresivas en rocas plásticas incompetentes. Se puede considerar como un parámetro total de esfuerzos. El parámetro  $J_w$  corresponde a la medición de la presión de agua que tiene un efecto negativo en la resistencia al esfuerzo cortante de las fisuras debido a la reducción en el esfuerzo normal. El agua puede ocasionar además un ablandamiento de las arcillas e inclusive lavarlo. El cociente  $J_w/SRF$ , es un factor empírico complicado que describe las “fuerzas activas”.

Se observa que el índice **Q** de la roca para túneles puede ser considerado como una función de sólo 3 parámetros que son medidas rudimentarias de: 1) El tamaño de los bloques ( $RQD/J_n$ ). 2) Resistencia al esfuerzo cortante entre bloques ( $J_r/J_a$ ). 3) Esfuerzos activos ( $J_w/SRF$ ).

Para relacionar el valor del índice **Q** a la estabilidad y requerimientos de soporte de excavaciones subterráneas, Barton et al (1974) definieron un parámetro adicional que lo llamaron “dimensión equivalente  $D_e$ ” de la excavación. Esta dimensión se obtiene al dividir el ancho, diámetro o altura de la excavación por una cantidad llamada “Relación de Soporte de la Excavación” ( $ESR = \text{Excavation Support Ratio}$ ).

$$D_e = \frac{\text{Ancho de la excavación, diámetro o altura (m)}}{\text{Relacion de soporte de la excavación, ESR}}$$

El valor de  $ESR$  está relacionado al uso que tendrá la excavación y hasta donde se puede permitir cierto grado de inestabilidad, como se presenta en la tabla 5; Barton et al (1974), sugieren los valores que se presentan en esta tabla.

Tabla 5

Valores de ESR de Acuerdo al Tipo de Excavación

TIPO DE EXCAVACION	ESR
A.- Excavaciones mineras provisionales	3,0 - 5,0
B.- Excavaciones mineras, túneles de aducción de agua para obras hidroeléctricas (con excepción de cámaras de alta presión para compuertas), túneles piloto (exploración), excavaciones parciales para cámaras subterráneas grandes.	1,6
C.- Cámara de almacenamiento, plantas subterráneas para el tratamiento de aguas, túneles carreteros y ferrocarrileros pequeños, cámara de alta presión, túneles auxiliares.	1,3
D.- Casas de máquinas, túneles carreteros y ferrocarrileros mayores, refugios de defensa civil, portadas y cruces de túnel.	1,0
E.- Estaciones núcleo eléctricas subterráneas, estaciones de ferrocarril, instalaciones para deportes y reuniones, fábricas.	0,8

Fuente: Palmström &amp; Broch, 2006.

Loset (1992) sugiere que para rocas con  $4 < Q < 30$ , el daño de voladura resultará en la generación de nuevas fisuras con una consecuente reducción local en el valor de Q para la roca circundante a la excavación. Él sugiere que esto puede ser explicado por reducción del valor de RQD para la zona dañada por la voladura.

Barton et al. (1980) proporcionan información adicional sobre las categorías de reforzamiento, como la longitud del anclaje, claros máximos sin soporte y presiones de soporte del techo para suplementar las recomendaciones de soporte, publicado en el artículo original (1974). Sin embargo, (Palmstrom & Broch, 2006) han hecho una crítica de las limitaciones del Q de Barton, estableciendo en la figura 5, que dentro del rectángulo en blanco es donde se cumple el Q, fuera de él, la relación no se cumple. Por consiguiente, fuera de dicha área, debería aplicarse otros métodos, hacer evaluaciones y cálculos suplementarios.

La longitud L de los pernos de anclaje puede ser estimado a partir del ancho B y la relación de soporte de la excavación ESR:

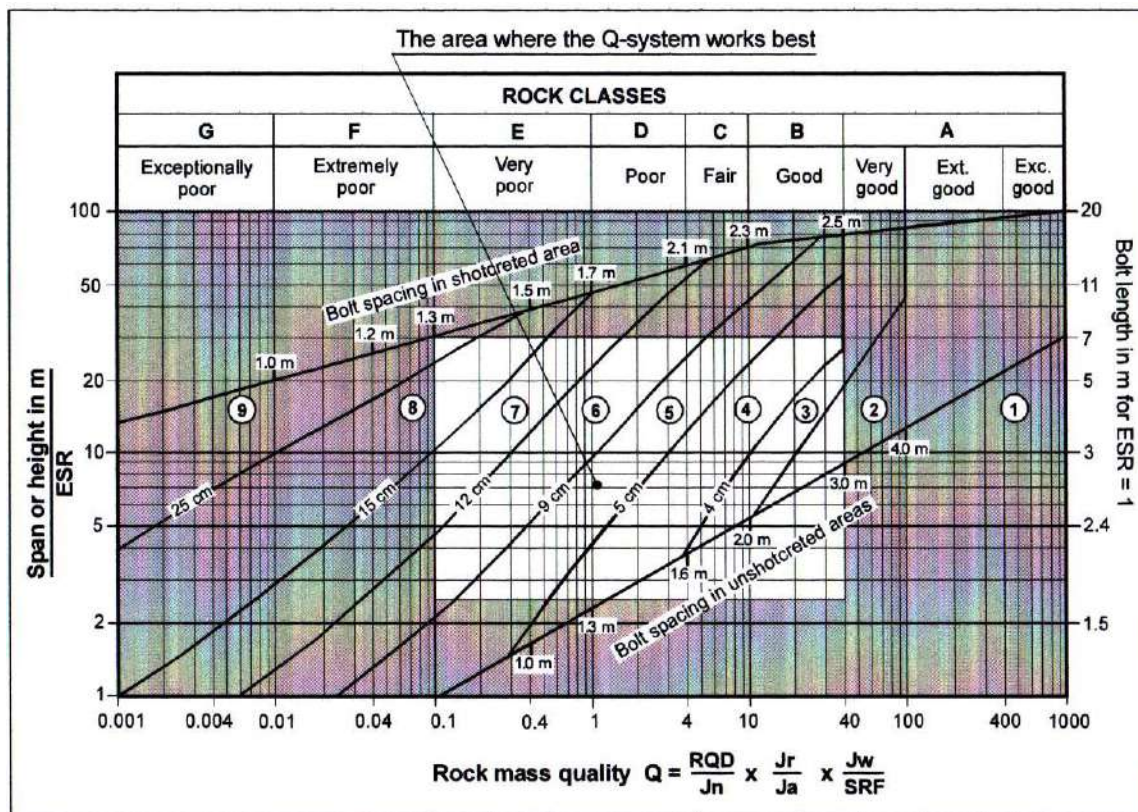
$$L = 2 + \frac{0,15B}{ESR}$$

El claro máximo sin soporte ( $S_m$ ) puede estimarse de:

$$S_m = 2ESRQ^{0,4}$$

Basado en los análisis de los casos registrados, Grimstad y Barton (1993) sugieren que la relación entre el valor de Q y la presión de soporte permanente del techo ( $P_t$ ) se estima como:

$$P_t = \frac{2\sqrt{J_n} Q^{-\frac{1}{3}}}{3J_r}$$



CATEGORIAS DE REFORZAMIENTO:

- |                                                                |                                                                     |
|----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| 1. Sin soporte                                                 | 6. Shotcrete reforzado con fibra, 9 – 12 cm y emperrado.            |
| 2. Emperrado puntual.                                          | 7. Shotcrete reforzado con fibra, 12 – 15 cm y Emperrado.           |
| 3. Emperrado sistemático                                       | 8. Shotcrete reforzado con fibra > 15 cm, arcos reforzados de acero |
| 4. Emperrado sistemático (y shotcrete sin refuerzo, 4 – 10 cm) | 9. Segmentos de concreto armado                                     |
| 5. Shotcrete reforzado con fibra, 5 - 9 cm y emperrado         |                                                                     |

Figura 5. Diagrama para determinar las categorías de sostenimiento basado en el índice  $Q$  según Barton y Broch (1993). Según Palmström y otros, las limitaciones de este diagrama se muestran fuera de rectángulo en blanco.

Fuente: Palmström & Broch, 2006.

### 2.3 Excavaciones en Macizos Rocosos

En caso de las excavaciones subterráneas, se nota la lenta acumulación de carga sobre los soportes. Nada en las discusiones relativas a desprendimiento de capas de rocas o comportamiento plástico alrededor de túneles, introduce el tiempo explícitamente; sin embargo, no es difícil imaginar la localización de la falla, la propagación de la grieta, y la redistribución de esfuerzos podría ocurrir progresivamente manifestando su pleno efecto sólo días o incluso semanas después de la excavación. Otros fenómenos también pueden

causar compresión de túneles. Las cargas de Roca pueden cambiar debido a la excavación adicional. La tensión efectiva puede aumentar debido al agua de drenaje en el túnel, o por el contrario puede disminuir debido a un aumento de la napa freática tras la reducción inicial en la corrida del túnel (Goodman, 1980). Cabe destacar que, el hombre excava la corteza terrestre tanto en la superficie como en el subsuelo, con distintos fines como aprovechamiento del material arrancado o generación de espacios abiertos.

### **2.3.1 Fines de las excavaciones en macizos rocosos**

**A) *Generación de espacios abiertos.*** En este caso no interesa el material arrancado, sino los espacios abiertos que dejan las excavaciones con distintos fines y usos. Es típico en construcción civil, puesto que por lo general las excavaciones se realizan para erigir estructuras como canales, túneles, zanjas para cimentaciones, cavernas, plataforma para carreteras, entre otros. En caso de la minería, se trata de construcciones como desarrollos (galerías, chimeneas, piques, etc.), almacenes, bodegas, talleres, polvorines entre otros (Giraldo, 2010).

La figura 6 (a) corresponde al túnel de aducción N° 4 del proyecto hidroeléctrico de Yuncan en Pasco (Perú) durante su construcción; mientras que la figura 6 (b) es una vista de la galería principal de la mina Reliquias en Castrovirreyna, Huancavelica (Perú). En este tipo de excavaciones es donde se aplican la mayor cantidad de elementos de sostenimiento en sus diversas formas y presentaciones, dado que constituyen las vías por donde circulan el personal y las maquinarias, y, se suministra todos los servicios y requerimientos a las labores subterráneas.

**B) *Aprovechamiento del material arrancado.*** En este caso, se hace la excavación con el propósito de utilizar el material arrancado. Son excavaciones típicas de la minería o cantera. En caso de la minería, se trata de la extracción del mineral aplicando distintos métodos de minado a cielo abierto o subterráneo, el material explotado puede ser mineral metálico (minerales de plomo, zinc, cobre, oro, plata, etc.) o no metálico (carbón, gemas, rocas ornamentales, etc.). Mientras que, en las canteras se extraen agregados para construcción (arena y piedra), explotación de caliza y otros componentes para la fabricación de cemento, entre otros casos (Giraldo, 2010).

Por consiguiente, este tipo de excavaciones son propias de la actividad minera, como ilustran las figuras 7 (a) y (b). En ambos casos, no interesa la cavidad que deja la excavación, sino el material arrancado.



(a)



(b)

Figura 6. Espacios Abiertos en Macizos Rocosos. (a) Túnel de Aducción en Yuncan (Pasco). (b) Galería Principal en la Mina Reliquias (Huancavelica).

Fuente: Elaboración propia.



(a)



(b)

Figura 7. Aprovechamiento del Material Arrancado. a) Mina de Oro a Tajo Abierto en Nicaragua. (b) Mina de Carbón Subterránea en La Libertad – Perú.

Fuente: Elaboración propia.

### 2.3.2 Métodos de excavación

A) **Métodos de excavación convencionales (Perforación y Voladura).** Este método de excavación requiere el uso de explosivos, para lo cual es necesario perforar la cantidad necesaria de taladros (con equipos mecanizados o manuales) y distribuidos apropiadamente en el área a excavar para fragmentar y desplazar el material arrancado. Se sigue un procedimiento cíclico en cada disparo, que básicamente consta de Marcado y perforación de los taladros, carguío de explosivos, disparo y ventilación, lavado y desquinche, limpieza (carguío y acarreo), y, sostenimiento. La voladura tiene una serie de

efectos negativos como: generación de gases nocivos, problemas de desactivación de tiros cortados, rocas volantes, golpe de aire y, sobre todo, perturbación de la roca remanente y contornos irregulares de la excavación como ilustra la figura 8 (a), que corresponde a la excavación de un túnel de aducción, donde la perforación se realizaba con jumbos hidráulicos, como puede observarse, aun cuando ya se ha aplicado shotcrete y pernos el contorno queda irregular. Este método demanda mayor costo de sostenimiento que el método de minado continuo.

**B) *Minado continuo.*** El método de minado continuo, consiste en el empleo de un equipo provisto de elementos de corte, que realiza simultáneamente la fragmentación y evacuación del material sin necesidad del uso de explosivos, en forma continua, con una intermitencia de paradas de acuerdo a su alcance o carrera, para desplazarse y posicionarse adecuadamente de acuerdo a la dirección de la excavación o minado. Actualmente, existe una variedad de minadores continuos tanto para operaciones superficiales como y subterráneas. Entre los minadores continuos para operaciones superficiales se tienen: la Rueda de cangilones (bucket wheel excavator), roadheader, surface miner, zanjadoras, entre otros. Los minadores continuos subterráneos, están diseñados para la explotación minera y desarrollo de estructuras civiles y mineros como galerías, túneles y chimeneas; dentro de estos equipos se pueden citar a las máquinas tuneleras (TBM), roadheader (también de uso en superficie), rozadoras para minas de carbón, mobile miner, etc. (Giraldo, 2010).

Los minadores continuos tienen una serie de ventajas sobre los métodos convencionales, como: Seguridad para el personal y el equipo, dado que, al no requerir el uso de explosivos no existe problema de gases y la perturbación a la roca remanente es prácticamente nula, traduciéndose en menor costo en sostenimiento y revestimiento. La sobre-excavación con minadores continuos, sobre todo en terrenos estables es prácticamente nula, como puede apreciarse en la figura 8 (b) que ilustra un túnel de aducción en excavación con TBM, se observa el contorno de un túnel completamente liso, lo cual significa, además, menor volumen de material arrancado para su remoción. En caso de las TBMs, el tiempo de construcción de un túnel se reduce a la mitad o tercera parte que demanda la perforación y voladura. En el frente de la excavación el personal no queda expuesto a colapsos, estallidos de roca y desprendimientos de roca.





*Figura 8. Métodos de Excavación Aplicados en el Mismo Túnel y Tipo de Roca en Yuncan II. (a) Método Convencional de Perforación y Voladura con Jumbo. (b) Con Minador Continuo (TBM).*

Fuente: Elaboración propia

## 2.4 Desprendimiento de Rocas

Los desprendimientos o caídas de rocas, se producen por la pérdida de equilibrio que sufren los fragmentos de roca o las capas expuestas de macizos rocosos, gracias al efecto de la gravedad, que en todo momento lo empuja hacia el centro de la tierra. Este fenómeno ocurre por la fragmentación de la roca provocada por fenómenos naturales (tectonismo, vulcanismo, intemperismo, erosión, la acción biológica, entre otros) o por el hombre (obras civiles, minería, agricultura, explosiones nucleares, etc.). Los desprendimientos de rocas, se desplazan en caída libre, rodamiento o deslizamiento colina abajo, o en combinación de éstos y quedan acumulados sobre vías, labores subterráneas o apiladas a lo largo de su deslizamiento sobre la superficie (Giraldo, 2016)

Los deslizamientos, son movimientos de roca, que se deslizan en una o varias superficies de falla, moviendo grandes volúmenes de roca y tierra a velocidades muy variadas y violentas. Los deslizamientos o movimientos en masa pueden clasificarse en: deslizamientos (rotacionales y traslacionales), flujos (de lodo, de detritos, rocas, reptación y solifluxión), desprendimientos o caídas de rocas y suelos, avalanchas (avalancha de rocas, colapsos), desplazamientos laterales (suelos y bloques re roca) (Delizamiento, 2018).

Los desprendimientos de roca, normalmente ocurren en áreas no sostenidas de los macizos rocosos, que van sufriendo alteración por el paso del tiempo o el uso de materiales explosivos que perturban el macizo rocoso, produciendo vibración y golpe de aire. También se producen desprendimientos de rocas en áreas que no han sido adecuadamente sostenidas,



ya sea el uso de elementos de sostenimiento inapropiados, parámetros de aplicación inadecuados como el diámetro de taladro en caso de los pernos de roca.

Los desprendimientos de rocas se producen en ambientes superficiales, subterráneos y acuáticos. En ambientes superficiales, caso de taludes de carreteras, canales, presas, taludes de minas a tajo abierto y canteras; en este caso, se produce deslizamiento de rocas, por haberse roto el ángulo de reposo natural de un macizo rocoso, para construir una estructura de ingeniería, peor aún, cuando el ángulo de talud de los bancos conformados es alto (muy empinado). En ambientes subterráneos como túneles, chimeneas, galerías y tajeos mineros, cavernas, cámaras, etc. en estos casos, los desprendimientos mayormente son por caída libre. En ambientes acuáticos como lagos, mares, etc. los desprendimientos ocurren por el socavamiento de la base del macizo rocoso, en este caso, el desprendimiento de rocas se manifiesta como deslizamientos.

La figura 9 (a) ilustra el desprendimiento de roca ocurrido en el Km 61 de la Carretera Central en Huarochirí (Perú) en febrero de 2017, en proceso de remoción, esta imagen fue captada por Radio Programas (RPP), interrumpiendo el tráfico hacia el centro del país. Análogamente, la figura 9 (b) corresponde al deslizamiento de rocas en la carretera Canta-Lima (2017), en el escombros se observan grandes bloques de rocas, cuya remoción requerirá de martillos o explosivos, además de los equipos comunes de carguío y acarreo



(a)

(b)

*Figura 9. Desprendimientos de rocas en taludes de carreteras sin sostenimiento en el Perú. (a) Carretera Central (Huarochirí). (b) Carretera Lima – Canta (Canta)*

Fuente: (a) Recuperada de <https://rpp.pe/peru/lima/desprendimiento-de-rocas-interrumpe-transito-en-la-carretera-central-noticia-1033564> y (b) Elaboración propia.

La figura 10, ilustra desprendimientos de roca en minas subterráneas, reportadas por Osinergmin. Donde la figura 10 (a) corresponde al desprendimiento de un bloque de roca de 2,5 TM en la mina San Ignacio de Morococha en San Vicente (Junín), en área sin

sostenimiento; mientras que la figura 10 (b), muestra el desprendimiento de roca en la mina Orcopampa (provincia de Castilla en Arequipa), donde se aprecia que, a pesar de haberse sostenido la excavación, se ha producido desprendimientos, se observan los pernos de roca (Split sets) rendidos que cuelgan del techo de la excavación, se puede inferir que este desprendimiento se produjo porque los pernos aplicados no han sido los más idóneos para el tipo de terreno, intensamente fracturado.

En obras de ingeniería, es posible evitar la ocurrencia de desprendimientos de roca, sosteniendo oportunamente las superficies expuestas por las excavaciones, dentro del período de auto sostenimiento del macizo rocoso (en función de su RMR), aplicando las herramientas de sostenimiento más apropiados de acuerdo a la calidad de roca. Lo cual implica que, es posible reducir los impactos ambientales que producen los desprendimientos de roca, así como la muerte y destrucción que causan, enlutando a familias enteras y alterando la marcha de la sociedad.



(a)

(b)

*Figura 10. Desprendimiento de rocas en ambientes subterráneos. (a) En la mina San Ignacio de Morococha (Junín). (b) En la mina Orcopampa (Arequipa)*

Fuente: Osinergmin

## 2.5 Sostenimiento de Macizos Rocosos

El sostenimiento artificial de macizos rocos, normalmente está orientado a la prevención de la ocurrencia de desprendimiento de rocas en la actividad minera (galerías, accesos, estabilidad de taludes en la minería superficial, etc.) y obras civiles (túneles, carreteras, que pueden causar daños ambientales, ocasionar accidentes, pérdidas económicas, etc.

El macizo rocoso puede auto soportarse por un período de tiempo de acuerdo a su clasificación geomecánica, desde nulo hasta completamente auto soportante, como ilustra la figura 11, se puede apreciar que dependiendo del claro activo, una excavación puede tener distintos tiempos de auto soporte. Los desprendimientos ocurren, cuando se deja expuesta un área excavada más allá del tiempo de auto soporte. Asimismo, cuando no se han utilizado o dimensionado adecuadamente los elementos de sostenimiento más apropiados. La figura 12 (a), ilustra el desprendimiento de rocas por el uso de sostenimiento inadecuado y falta de remplazo oportuno de los mismos y la figura 12 (b), muestra bloques de roca desprendidos por falta de elementos de sostenimiento.

El sostenimiento de excavaciones en roca, sobre todo subterráneas es de vital importancia; puesto que, al generar un vacío en el seno del macizo rocoso, la roca remanente sufre un desequilibrio, lo cual se agrava aún más, si la excavación se realiza usando explosivos. Por consiguiente, para garantizar el avance de la excavación, bajo los principios de seguridad y control ambiental, se debe diseñar, seleccionar y aplicar los elementos de sostenimiento más apropiados, de acuerdo a tipo de roca, dimensiones de la excavación, entre otros factores.

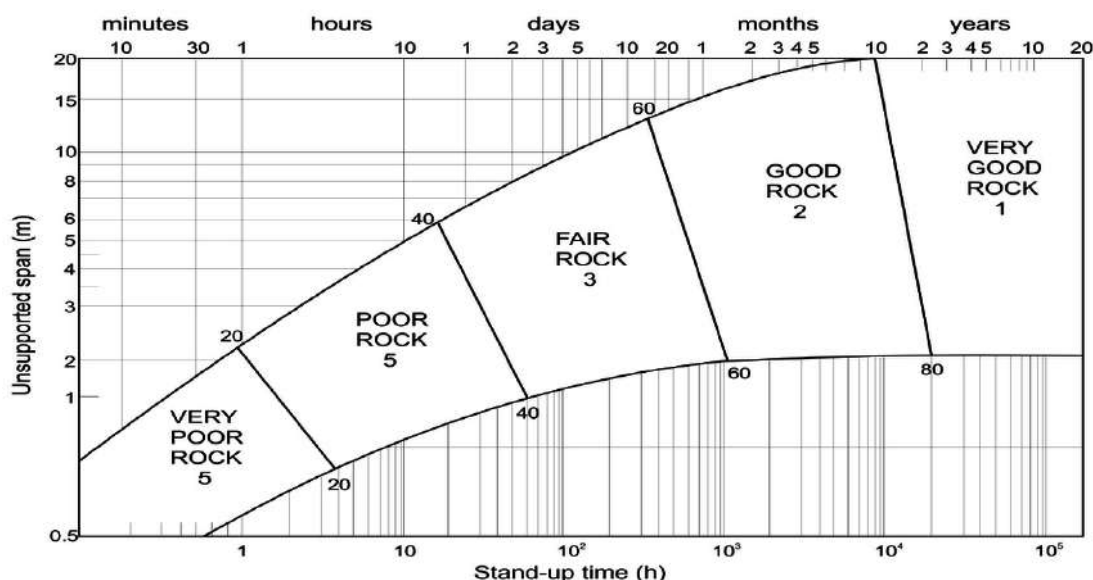


Figura 11. Tiempo de Autosoporte de la Roca en las Excavaciones Subterráneas (Bieniawski, 1989)

Fuente: Hoek et al. 2002

El objetivo fundamental del anclaje de las rocas, es preservar la estabilidad de la roca remanente en el entorno de la excavación, sometida a tensiones, actuando como un arco o viga. Los pernos de anclaje deben instalarse tan pronto como sea posible, antes que se

produzca la separación de las capas o el movimiento de las juntas. Cuando los pernos van a cumplir la función de anclaje permanente, deben protegerse contra la corrosión. Las barras no tensionadas instaladas con lechadas pueden actuar en forma conveniente para mantener la estabilidad o disipar los esfuerzos pico (Megaw & Bartlett, 1988).



*Figura 12. Desprendimientos de Roca. (a) Por Falta de Mantenimiento del Sostenimiento con Madera. (b) Desprendimiento por Falta de Sostenimiento.*  
Fuente: Osinergmin

Los elementos de sostenimiento son materiales o herramientas diseñados para evitar el desprendimiento de rocas o la subsidencia de la cobertura de una excavación en el macizo rocoso. Con el correr del tiempo, han venido introduciéndose a la industria de la excavación una variedad de tipos de sostenimiento, como se detalla a continuación.

**2.5.1 Sostenimiento con roca.** La roca ha sido uno de los primeros elementos de sostenimiento utilizados por el hombre, la figura 13(a) es un ejemplo de este tipo de sostenimiento en una galería. Los gaviones son otra forma de sostenimiento con roca en complemento con las mallas de acero, se aplican normalmente como muros de contención en taludes de carreteras, cauces de ríos, presas, entre otros. Asimismo, aunque no es propiamente como sostenimiento, los gaviones se pueden construir como cercos, muros divisorios de terrenos e incluso se puede hacer edificaciones. La figura 13 (b) muestra la construcción de gaviones en andenería, como muro de contención en la construcción de una carretera.





(a)

(b)

Figura 13. Sostenimiento con roca. (a) Galería. (b) Gaviones en andenería

Fuente: (a) Recuperado de <https://www.interempresas.net/Mineria/Articulos/139073-Minas-y-galerias-de-agua-para-la-captacion-de-aguas-subterraneas-en-las-Islas-Canarias.html> y (b) Elaboración propia

**2.5.2 Sostenimiento con madera.** La madera en sostenimiento de excavaciones subterráneas tuvo su auge hasta la II Guerra Mundial. Se caracteriza por su peso liviano, facilidad de transporte y facilidad de uso, es 11 veces más liviana que el acero, pero dos veces más frágil. No obstante, de esas cualidades, sus principales desventajas radican en que la humedad y su estructura fibrosa deciden su capacidad de resistencia, además de que son fácilmente atacables por los hongos y es combustible que puede contribuir a la propagación del fuego en caso de incendios. En sostenimiento de labores subterráneas, la madera está sometida a los siguientes efectos: flexión, compresión, pandeo y cizalla. La resistencia a la tensión de la madera es prácticamente el doble de su resistencia a la compresión (cuando la carga es paralela a su fibra); la resistencia al pandeo depende entre otros factores de su diámetro y longitud, la resistencia a la flexión se mide aplicando carga en el centro de una viga hasta su ruptura, depende de la longitud, ancho y peralte de la viga de ensayo (Birön & Arioglu, 1987).

Entre las estructuras de sostenimiento con madera, se pueden citar los cuadros (cónicos, cuadrados o cojos). La figura 14 (a) ilustra la portada de la galería en una mina de carbón en Alto Chicama en el norte del Perú, sostenido con cuadros de madera de eucalipto, se pueden apreciar sus elementos (postes, sombreros, tirantes, marchavante y el enramado o enrejado) y la figura 14 (b) muestra el sostenimiento con cuadros cónicos de madera en una ventana de acceso a un túnel de aducción, durante su construcción, igual que en el caso anterior se observan sus elementos. Asimismo, la figura 15 (a), corresponde a un conjunto de cuadros cojos rendidos antes de su reemplazo y la figura 15 (b), ilustra el típico sostenimiento con puntales de madera en un tajeo de una mina de carbón (similar al de la minería metálica).



(a)



(b)

*Figura 14. Sostenimiento con Madera. (a) Cuadro Cono Mostrando sus Elementos en una Mina de Carbón. b) Cuadros Cono en la Ventana de Acceso a un Túnel.*

Fuente: Elaboración propia.

El marchavante (forepoling), es un complemento del sostenimiento con cuadros de madera o arcos de acero, cuando la excavación del túnel o galería atraviesa terreno suelto o deleznable. El método consiste en colocar vigas de madera o acero fuera de la estructura principal de sostenimiento con cierto realce antes de proceder con el próximo ciclo de excavación, evitando así, desprendimientos o derrumbes en terreno malo. Las dimensiones de las vigas dependen del peso que van a soportar, cuando el marchavante es de madera, se

usan cuartones de 4" x 4" o 6" x 6" por 12 pies de longitud. Sean las vigas de madera o acero, para instalarlas son empujados hacia delante hasta del extremo posterior sobresalga alrededor de 50 cm de la estructura donde se apoya (Giraldo, 2010).

Otras aplicaciones de la madera en sostenimiento en mina son: En la explotación con cuadros (square set), en chimeneas (chute y camino), entre otros. En caso de los pernos de eucalipto, éstos se comportan en forma elástica, ofreciendo resistencia permanente de acuerdo a las condiciones de humedad, parámetro fundamental en este tipo de pernos, para una adecuada capacidad de anclaje debe ser superior a 18 % (Fernández, 1998).



(a)



(b)

*Figura 15. Sostenimiento con madera en minas de carbón. (a) Cuadros cojos rendidos antes de su reemplazo. (b) Puntales en un tajeo.*

Fuente: Elaboración propia.

### 2.5.3 Sostenimiento con cables

Este tipo de sostenimiento se aplica cuando la excavación y el terreno requieren anclajes muy profundos, como es el caso de los techos de las grandes cavernas, donde no es posible usar pernos de roca comunes. Este elemento de sostenimiento trabaja en conjunción con un material de acoplamiento como cemento o resina. Cuando se aplica a la estabilización de taludes, permiten incrementar el ángulo de talud, se instalan perpendicular a la cara del talud hasta una profundidad de 15 a 20 m. Una vez que se tensan, se inyecta lechada de cemento para protegerlo de la corrosión (López, 1999). El anclaje con cables consta de varios



cables, los que a su vez se componen de 7 alambres de 4 a 5 mm de diámetro, son flexibles y su longitud teóricamente es ilimitada (se presenta en rollos de 3000 m).

La figura 16 (a) ilustra un cable de acero para sostenimiento, por otro lado, la figura 16 (b) muestra un ejemplo de sostenimiento con cables. También se usa este elemento de sostenimiento en combinación con la malla metálica, para replegarla a la forma del terreno, como ilustra la figura 16 (c), para evitar la caída de rocas. Tienen distintas presentaciones como: Liso, minicaged y birdcaged.



(a)



(b)



(c)

*Figura 16. Cables de Acero para el Sostenimiento de Macizos Rocosos. (a) Muestra de Cable para Anclaje. (b) Cables Instalados. (c) Cables Sujetando Mallas de Acero.*

Fuente: Recuperados de (a) <https://cintatex.es/home/544-cable-de-acero-galvanizado-6x191-4mm.html>, (b) <http://www.pilotesyobras.com/anclajes-tesados-cables.asp> y (c) <http://gesprota.com/malla-reforzada-con-cable/>



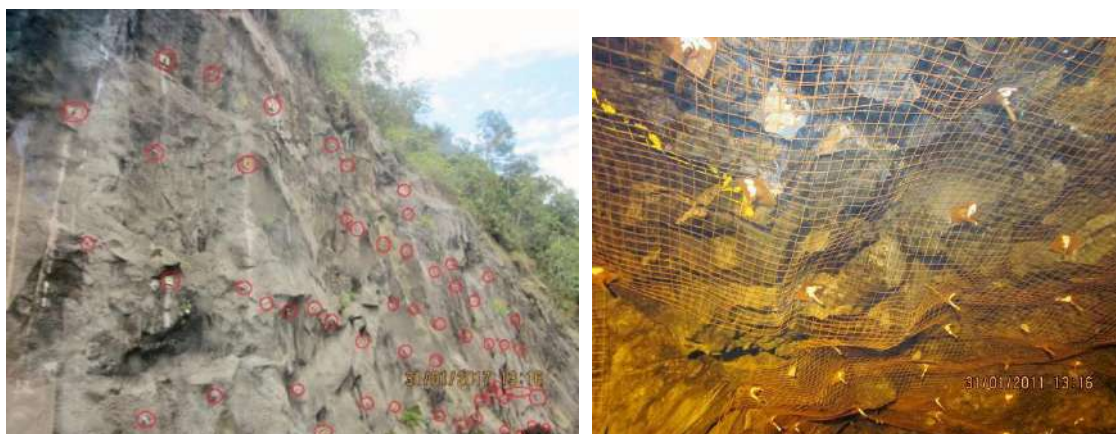
#### **2.5.4 Sostenimiento con pernos (anclajes, spiling).**

Hay dos principios básicos en la estabilización de la roca por medio de anclaje: primero, la roca es reforzada por elementos de acero que se encargan de la tracción, y para algunos se extienden también a la cizalladura; segundo, el medio es bloqueado por el pretensado de pernos anclados, y esto pone en efecto las fuerzas de fricción a lo largo de los planos naturales de discontinuidad. Las excavaciones subterráneas demandan una aproximación diferente al equilibrio del medio rocoso. La perturbación del equilibrio se manifiesta como presión de roca que puede conducir al hundimiento de espacios subterráneos. La fijación de anclajes de modo que la tensión sea transferido al terreno, se logra mediante tres métodos: a) por refuerzo mecánico, la base del anclaje contra la roca se configura final de la perforación. b) Por adherencia del tendón de anclaje a la roca o suelo con cemento. c) Por acoplamiento de una base expandida en el extremo del anclaje (Hobst & Zajíc, 1983).

En formaciones estratificadas, los pernos unen los estratos unos con otros generando una viga de mayor resistencia que los estratos individuales. Asimismo, refuerzan y mantienen inalterable el arco natural que se genera en toda excavación subterránea (Coates, 1970).

Los pernos de roca son elementos de sostenimiento de macizos rocosos, tanto en superficie como en excavaciones subterráneas, la figura 17 (a), ilustra el sostenimiento del talud en un tramo de la carretera Tarapoto – Yurimaguas con barras helicoidales luego de aplicado el shotcrete, los círculos rojos encierran las cabezas de los pernos, donde las planchuelas están sujetadas con tuercas. La figura 17 (b), corresponde al típico sostenimiento en terreno fracturado en labores subterráneas con mallas sujetadas en este caso con barras helicoidales en la mina Condestable. Todos los pernos de roca, se instalan dentro de taladros previamente perforados en la roca, con un diámetro establecido por el fabricante y profundidad acorde con la longitud de los pernos.

Asimismo, por un lado, se tienen los pernos que se instalan solos, es decir no requieren otro material para hacer anclaje, como es el caso de los pernos inflables (Swellex, Hydrabolt, Python, entre otros) y de constricción (Split Sets). Por otro lado, se tienen los pernos que requieren un material de acoplamiento como cemento o resina, tal es caso de las barras de acero y barras helicoidales. Por consiguiente, existe una variedad de pernos como se detalla más adelante.



(a)

(b)

*Figura 17. Sostenimiento con Pernos de Roca. (a) Barra Helicoidal en el Talud de un Tamo de la Carretera Tarapoto – Yurimaguas. (b) Barra Helicoidal en la Mina Condestable en Terreno Fracturado.*

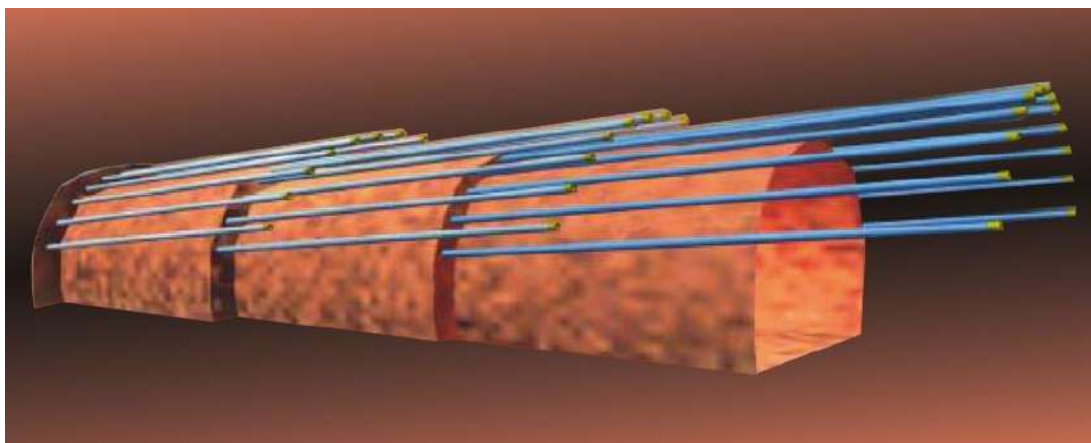
Fuente: Elaboración propia.

Tradicionalmente, el uso de pernos de roca ha sido limitado para reforzar rocas razonablemente sólidas. Condiciones de roca pobremente consolidadas y deleznales han requerido soporte externo caro. Los factores básicos subyacentes son: La sensibilidad inherente de la resina al calor, edad y almacenamiento inapropiado; parámetros durante la instalación; presencia de grietas y flujo de agua y destreza del operador. Los pernos Swellex soportan la roca inmediatamente después de su instalación y han sido usados exitosamente para completar muchos túneles en condiciones de roca difíciles, reduciendo al mismo tiempo los costos de sostenimiento. La presión ejercida por las paredes externas de los Swellex durante la instalación, compacta la roca en el entorno del taladro, generando un arco de sostenimiento (Atlas Copco, 2003).

**Spilling.** Es una variante de sostenimiento con pernos de barra rígida, generalmente autoperforantes, dado que se aplica en terrenos totalmente deleznales, suaves, gravas, arena, etc. para sostener delante del frente. Para la instalación de estos pernos, los taladros se perforan de una longitud y espaciamiento predeterminados de acuerdo a la resistencia del terreno alrededor del perímetro del túnel, fuera del perfil final teórico. El ángulo de realce de los taladros, es exactamente el mismo que para los taladros de contorno en las voladuras. Estos taladros son limpiados sopleteando, antes de rellenarlos con lechada de cemento e introducir las barras de tal forma que, sus extremos libres queden fuera del taladro 300 mm. Es sumamente importante tener mucho control durante la perforación de los taladros de voladura, cuya profundidad como regla general no debe ser superior a los 2/3 de la longitud

de los spiles utilizados. Ej. Si un spile tiene 3 m de longitud, la perforación para voladura a lo más debe tener 2 m de profundidad. Si las condiciones de terreno son extremas, se debe incrementar la longitud de los spiles y reducir la profundidad de los taladros de voladura, a fin que los spiles queden en capas superpuestas.

El mecanismo como trabajan los spiles, es que la parte delantera de estas herramientas, queda empotrado delante del frente y el extremo posterior queda asegurado. Por tanto, cualquier presión causada por el colapso del terreno a lo largo de la barra se neutraliza. Capas superpuestas de spiles actúan en conjunto como un tejido, soportando el terreno y actuando de la misma forma que las barras de reforzamiento en concreto, como ilustra la figura 18. Bajo condiciones extremas, los spiles se limpian completamente alrededor del contorno de la excavación de tal forma que, queden completamente empotrados en el shotcrete y actuar como un refuerzo.



*Figura 18. Recreación de la Instalación de Spiles con Pernos Autoperforantes.*  
Fuente: Atlas Copco AB.

**2.5.5 Sostenimiento con arcos de acero.** El acero es una aleación de hierro con carbono, que adicionalmente puede contener manganeso, silicio, níquel, cromo y molibdeno en diferentes porcentajes de acuerdo a las propiedades que se requiere del acero; tiene como impurezas el fósforo (0,01 – 0,08 %) y azufre (0,01 – 0,06 %). Las cimbras utilizadas en excavaciones subterráneas son de acero común (st. 37 al st. 52). Entre las características mecánicas se deben tener en cuenta: a) Relación esfuerzo-deformación, cuyo gráfico tiene un comportamiento lineal hasta el punto 0,2 % de deformación, luego del cual se tiene la fluencia con deformación constante hasta un límite donde se produce la ruptura, como puede observarse en la figura 19. b) Tipo de falla (ruptura), la ruptura del acero se produce tanto por ductilidad como por fragilidad, la ruptura por ductilidad se produce después de 100 a

200 veces la deformación del punto de fluencia, la ruptura por fragilidad se presenta en aceros con alto contenido de carbono. c) Dureza, se mide de acuerdo a su resistencia a la penetración, existe diferentes escalas de medida de la dureza como el Brinell. Las ventajas del acero respecto a la madera, ha desplazado su uso en muchas minas y sobre todo en la excavación de túneles, a pesar de su alto costo. Entre las ventajas del acero se pueden destacar: a) Homogeneidad libre de defectos naturales, que posibilita usar bajos factores de seguridad en el diseño del sostenimiento. b) Tiene un módulo de elasticidad de Young más elevado que de otros materiales estructurales ( $E = 2000000 \text{ kg/cm}^2$ ), garantizando alta resistencia a la deformación. c) La temperatura y la humedad afectan menos que a la madera. d) El acero es un material reciclable (Birön & Arioglu, 1987).

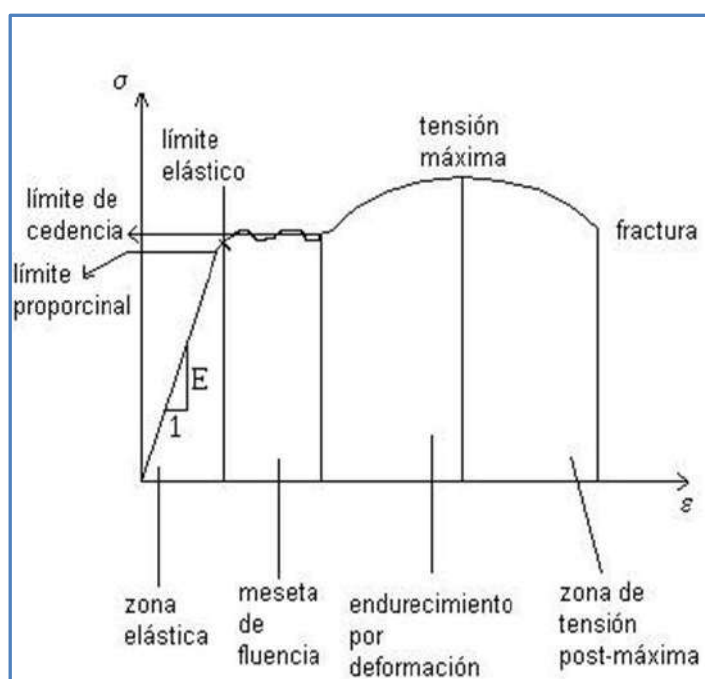


Figura 19. Comportamiento del Acero, Esfuerzo Vs Deformación  
Fuente: Birön (1987).

Los arcos de acero, Llamados también cimbras o cerchas, son elementos de sostenimiento cuya aplicación es en terrenos muy fracturados o deleznales como las zonas de fallas. Se presenta en diferentes formas como: Baúl, circular, herradura y variantes, la figura 20 (a) corresponde al sostenimiento del portal de la galería principal de la mina Reliquias de castrovirreyna (Huancavelica) con arcos de acero en “baúl”, enrejado y encribado con puntales de eucalipto y relleno con sacos de arena para impedir el aflojamiento del techo y desprendimientos. La figura 20 (b), corresponde al sostenimiento en un túnel de gran sección con arcos de acero en “herradura”.

Los elementos para la fortificación de excavaciones tienen las siguientes características: a) Perfil del material, la resistencia de una viga es proporcional al área de su sección transversal. b) Momentos de inercia y módulo de sección. c) Relación de Rankin, es la relación entre el esfuerzo de compresión y el esfuerzo de flambeo (pandeo), para un adecuado diseño debe aproximarse a 1. d) Esfuerzo permisible, el acero st. 37 tiene un esfuerzo permisible de  $1400 \text{ kg/cm}^2$  y un esfuerzo de deformación plástica de  $2400 \text{ kg/cm}^2$ , siendo el factor de seguridad de  $2400/1400 = 1,71$ , en aceros de calidad superior el límite fluencia es superior.



(a)



(b)

*Figura 20. Sostenimiento con arcos de acero. (a) En galería minera. (b) Túnel de uso civil.*

Fuente: (a) Elaboración propia y (b) Recuperada de <https://www.bulteck.com/arcos/>

**2.5.6 Sostenimiento con concreto.** El concreto es básicamente la mezcla de cemento, agregados y agua; mezcla que al consolidarse o fraguarse, adquiere una serie de propiedades principalmente resistentes. Es el material predominante en la construcción en el mundo, debido básicamente a la disponibilidad de sus componentes y fácilmente manipulable. En las excavaciones en roca, como se aplica en distintas formas como: Concreto lanzado (shotcrete), concreto armado y concreto prefabricado (dovelas). Este tipo de sostenimiento, por lo general se aplica en construcciones subterráneas de uso civil, como túneles, cavernas, chimeneas, entre otros. La figura 21 (a) ilustra la aplicación de shotcrete



durante la excavación de un túnel con una TBM, y la figura 21 (b) corresponde al sostenimiento concluido con shotcrete en un túnel excavado con perforación y voladura, se puede observar la irregularidad del contorno de excavación y las cabezas de los pernos de anclaje. Es de destacar también que existen distintos tipos de shotcrete, húmedo, seco, con acelerantes, con fibras de acero o sintéticos, etc. con la finalidad de incrementar su resistencia.



(a)

(b)

*Figura 21. Sostenimiento de Túneles con Shotcrete. (a) Aplicación Durante la Excavación con TBM. (b) Túnel excavado con perforación y voladura terminado.*

Fuente: Recuperadas de (a) [https://www.conpax.cl/construccion\\_4.html](https://www.conpax.cl/construccion_4.html) y (b) <https://concretosespecializados.argos.co/lanzado.html>

También el sostenimiento con concreto se puede aplicar vaciado y/o prefabricados como ilustran las figuras 22 (a) y (b); donde la figura 22 (a) corresponde a los segmentos de dovelas en la planta de fabricación, listos para su traslado e instalación durante la excavación del túnel con TBMs. La figura 22 (b), muestra anillos de dovelas ya instalados y haciendo sostenimiento en un túnel excavado con TBM; el número de segmentos, depende de la sección del túnel y en cualquier caso, lleva un segmento pequeño que actúa como llave para asegurar cada anillo y quedan completamente consolidados con concreto; este tipo de sostenimiento se aplica cuando el túnel se construye en un terreno suelto, totalmente deleznable inclusive con flujo de agua.



(a)



(b)

*Figura 22. Sostenimiento de Túneles con Dovelas. (a) Dovelas en la Planta de fabricación. (b) Anillos de Dovelas Instaladas.*

Fuente: Recuperadas de (a) <https://www.interempresas.net/ObrasPublicas/Articulos/45919-Dovelas-una-solucion-prefabricada.html> y (b) <https://ecomovilidad.net/madrid/tuneles-madrid-tuneladoras/>

**2.5.7 Sostenimiento con mallas de acero.** Estos elementos de sostenimiento, se aplican en combinación con otros, como pernos, cables, shotcrete, entre otros, con la finalidad de sostener las excavaciones en rocas muy fracturadas o deleznable, para así evitar la caída de fragmentos de roca que pueden causar accidentes o contribuir al progreso de la desestabilización. Existen una variedad de tipos mallas de acero, entre otras, las electrosoldadas y las trenzadas. La figura 23 (a) ilustra la instalación de mallas de acero electrosoldadas y fijadas con pernos de roca en todo el contorno de una galería (ver también la figura 17 (b)), mientras que la figura N° 23 (b) muestra una parte de la malla trenzada sujeta por las planchuelas de barras helicoidales, en el techo de una excavación subterránea.

**2.5.8 sostenimiento con relleno.** Los rellenos por lo general, se aplican en la explotación de minas subterráneas, a fin de estabilizar las paredes de las rocas encajonantes de los filones o cuerpos mineralizados en proceso de explotación, permitiendo avanzar con el minado horizontal y verticalmente. Existe una variedad de rellenos como: detríticos, neumático, hidráulico y en pasta. Entre los métodos de explotación que aplican este tipo de sostenimiento se tienen el “Corte y Relleno” (cut and fill) ascendente y descendente, cámaras y pilares con relleno, entre otros.



*Figura 23.* Sostenimiento de Macizos Rosos con Mallas de Acero y Pernos. (a) Malla Electrosoldada. (b) Malla Trenzada.

Fuente: Recuperadas de (a) <https://es.slideshare.net/MAoT04195/sostenimiento-y-geomecanica1> (b) <https://www.isem.org.pe/portal/files/recurso/revista/77.pdf>

El relleno detrítico fue uno de los primeros de su especie y se caracterizan porque el material de relleno es el material estéril (desmonte) extraído en la explotación de la mina, cuando el relleno se extrae de una cantera en superficie (similar al material de afirmado en carreteras), que bien puede ser material morrénico, fluvial o roca muy fragmentada que no contenga arcilla, se transporta e introduce a través de chimeneas (echaderos) a los tajeos, de donde se extiende con winches de arrastre(rastrillos) o empleando equipos de carguío y acarreo como esquematiza la figura 24 al método de explotación “Corte y Relleno Ascendente”, donde se observa que el relleno detrítico es introducido por una chimenea, que luego de culminado el corte del bloque será extendido con los mismos equipos que realizan la limpieza del mineral fragmentado. El relleno detrítico tiene una serie de desventajas como la dificultad para trasladar y extender en el tajeo, traducándose en la demanda de mucho tiempo para el rellenado en cada ciclo de corte, por esta y otras desventajas, su aplicación actualmente, es prácticamente en pequeña minería.

En operaciones mineras mayores a la pequeña, actualmente se aprovecha el relave, haciendo un tratamiento en la planta de relleno, donde básicamente se eliminan la lama para mantener una granulometría apropiada y agregar una porción de cemento portland, la pulpa (relave, cemento y agua) se bombea a los tajeos a través de tuberías, por lo que es preciso controlar el porcentaje de sólidos y el agua para que fluya adecuadamente a través de las tuberías, hasta los tajeos. Este tipo de relleno, tiene una serie de ventajas sobre el relleno detrítico, como la rapidez de rellenado del tajeo y calidad de sostenimiento. Dentro de este tipo de relleno se tienen el relleno hidráulico con un contenido de sólidos entre 60 % y 73 %



(Ver figura 25 (a)) y el relleno en pasta cuyo contenido de sólidos está entre 65 y 85 % (Ver figura 25 (b)).

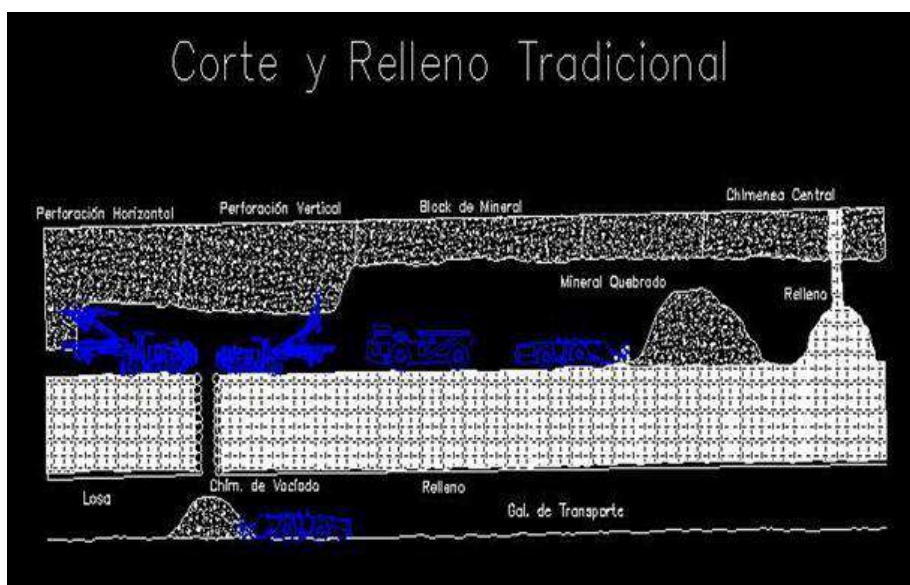


Figura 24. Esquema del Método de Explotación por “Corte y Relleno Ascendente”, con Relleno Detrítico  
Fuente: Recuperado de <https://es.slideshare.net/jonatanarturo56/rellenos-detriticos-de-mina>



(a)

(b)

Figura 25. Relleno a Partir del Relave. (a) Tajeo Rellenado con Relleno Hidráulico. (b) Relleno en pasta.  
Fuente: Recuperadas de [http://www.iimp.org.pe/website2/jueves/ultimo311/jm20130228\\_minsur.pdf](http://www.iimp.org.pe/website2/jueves/ultimo311/jm20130228_minsur.pdf)

## 2.6 Pernos de Roca

“Es una técnica de sostenimiento que, en esencia, consiste en anclar en el interior de las rocas un material resistente, como barra o tubo que aporta una resistencia a tracción y, confinado al macizo rocoso, permite aprovechar las características resistentes propias de las rocas facilitando así su sostenimiento.” (López, 1999).

**2.6.1 Principio de funcionamiento de los pernos de roca.** Si la excavación está ubicado a gran profundidad de la superficie, suele estar protegido contra la presión de roca de cobertura por un arco de roca natural situado sobre el techo de la excavación. El anclaje soporta únicamente la carga por debajo del arco natural. Antes que el contorno de la excavación esté consolidado, menor es el grado de asentamiento del arco natural. La magnitud de las fuerzas de anclaje requerido ( $F$ ) para bloquear la roca aflojada en la zona del arco natural, es determinada por la densidad de roca, que sostendrá cada elemento de anclaje o perno, mediante la siguiente ecuación:

$$F = f A \rho h$$

Donde:

$F$  = Fuerza de anclaje (TM)

$f$  = Factor de seguridad = 1,5 a 2,0

$\rho$  = Densidad de la roca (TM/m<sup>3</sup>)

$h$  = Espesor de la capa de roca sostenida (m)

En rocas más débiles con alteración química o mecánica y en la excavación de grandes excavaciones, donde la zona de arco natural de roca está formada a gran distancia del contorno de la excavación, la roca aflojada en las inmediaciones de la excavación se refuerza con pernos de anclaje. La roca pretensada de esta manera, forma un arco de auto soporte que previene la propagación de las fisuras, más allá de la roca alterada. El bien conocido NATM (New Austrian Tunneling Method), está basado en este principio (Hobst & Zajíc, 1983).

***Fijación mecánica de los pernos.*** Se emplea principalmente en anclajes temporales en rocas duras. La fijación del dispositivo se sujeta en el extremo del perno dentro del taladro, por la expansión de esta base contra la pared del taladro. En teoría la presión de expansión puede incrementarse hasta alcanzar el límite de la resistencia a la compresión de la roca.

***Fijación por tensión (base de tensión).*** Pernos con bases de tracción son los más simples en términos de fijación y pre tensión. Inmediatamente después de posicionar el perno dentro del taladro, se puede tensar inmediatamente tirando del cuneiforme o soporte cónico situado en el extremo de la barra. Esto suele hacerse primero manualmente y luego con la tuerca enroscada en el extremo exterior del perno. Pernos de este tipo se fabrican en varios países, siendo el más conocido es el perno Goldemberg fabricado en Francia.

***Fijación por enroscado (base roscada).*** Pernos con bases roscadas son fijados por rotación de la propia barra. De esta manera una pieza cónica o cuneiforme en el extremo de la barra se desliza entre las mordazas obligando abrirse y fijarse en la pared de los taladros.

***Pernos de desplazamiento controlado.*** Los pernos de roca comunes, ceden y se estiran hasta 18% y luego se rompen. Los últimos estudios de mecánica de rocas sobre las ventajas de permitir algún desplazamiento de los soportes en las excavaciones subterráneas, ha llevado al diseño de pernos con desplazamiento controlado. Un acoplamiento especial permite controlar la elongación de los pernos si la carga excede el límite permisible; esta elongación tiene lugar automáticamente y permite moverse a la roca ligeramente liberando las tensiones, de esa forma la roca adquiere un nuevo estado de equilibrio (Atlas Copco, 2003).

**2.6.2 Clasificación de los pernos de roca.** Existe una variedad de anclajes, como tal, pueden clasificarse en distintas formas, siendo una de ellas la siguiente: a) En función al mecanismo de trabajo, b) Período de trabajo y c) Tipos de anclaje. De acuerdo al mecanismo de trabajo: Se tienen los anclajes pasivos que se caracterizan por su rigidez y actuación cuando la capa inestable de terreno pretende desplazarse; los anclajes activos, que entran en acción inmediatamente después de su instalación y, anclajes mixtos. De acuerdo al período de trabajo: se tienen los anclajes temporales o provisionales, se considera así a los anclajes que tienen una vida útil de dos años, período en que el terreno es reforzado con otros elementos de sostenimiento definitivo. Los anclajes permanentes, se dimensionan con mayores coeficientes de seguridad a fin que su vida útil sea superior a los dos años, tienen mayor protección contra la corrosión.

**A) Pernos de barras rígidas.**

i) ***Barras con ranura y cuña.*** El anclaje con base de cuña es el tipo de perno más antiguo y el más simple de fabricar. La barra de anclaje, fabricado de acero tiene una sección transversal circular de diámetro de 22 a 26 mm, al que le practica corte longitudinal en el extremo que irá al fondo del taladro, y una cuña de acero se inserta en la hendidura así formado, como ilustra la figura 26. El perno es fijado por el martilleo hacia adentro de modo que la cuña es forzada encajar en la hendidura, por lo tanto, abre y presiona contra la pared

del taladro. El perno con base de cuña ha sido usado por muchos años, particularmente en minas. Este tipo de perno se puede hacer rápidamente in situ. La fisura se corta con oxicorte, y la cuña es forjada a partir de un trozo de barra de perforación o material similar. Una óptima especificación para este tipo de perno es: diámetro de la barra 22 a 26 mm; longitud total, hasta 3 m; la longitud del corte y la cuña tienen aproximadamente 14 cm;  $7^\circ$  el ángulo de la cuña; la diferencia de diámetros de la barra y el taladro, es máximo de 5 a 7 mm; la longitud de las barras, debe ser 10 a 15 cm mayor que de los taladros. La cuña-tornillo base puede utilizarse con éxito en todas las rocas duras. La capacidad de carga de 70 a 120 KN se puede alcanzar, con una extracción parcial de hasta 10 mm (Hobst & Zajíc, 1983).

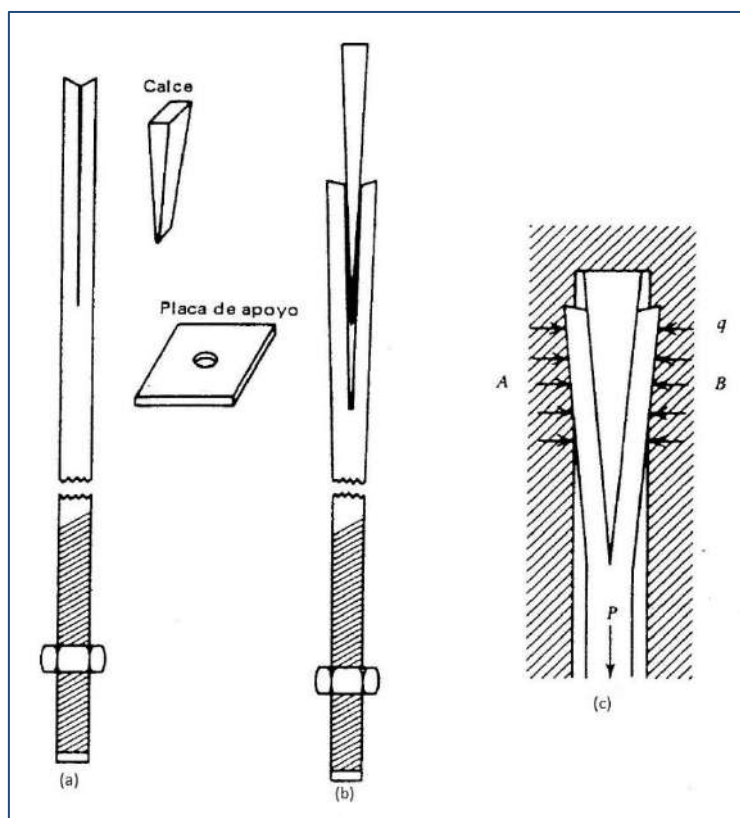


Figura 26. Pernos de Barra con Ranura y Cuña  
Fuente: Hobst (1983).

Según Birön y Arioğlu (1987), los pernos con ranura y cuña son contruidos de acero maleable de 22 a 30 mm de diámetro y de 0,5 a 2,5 m de longitud, el extremo que irá al fondo del taladro (diámetro 4 mm mayor que los pernos) se ranura en una longitud de 150 mm donde se coloca una cuña, la que por la percusión del equipo hace que la ranura se expanda ajustando este extremo del perno contra la roca.

ii) *Barras con concha de expansión.* Pernos con concha de expansión, consiste en una varilla de acero de 17 a 22 mm de diámetro, que en su extremo que va dentro del taladro sostiene una pieza cónica o trapezoidal; lleva 4 conchas alrededor del bloque cónico, que al ser ajustado este último, hace que se desplacen horizontalmente hasta quedar acopladas y presionadas contra la pared del taladro, haciendo anclaje, como ilustra la figura 27. c) Pernos con inyección de lechada de cemento, en este caso, la lechada de cemento (cemento/arena fina/agua) se inyecta hasta la mitad del taladro luego se introduce la barra por rotopercusión del equipo. d) Pernos con resina, al igual que la lechada de cemento requiere un tiempo prolongado para su fraguado, se introdujo la resina que tiene un fraguado veloz. e) pernos de expansión, de fibra de vidrio, auto perforantes y de fricción.

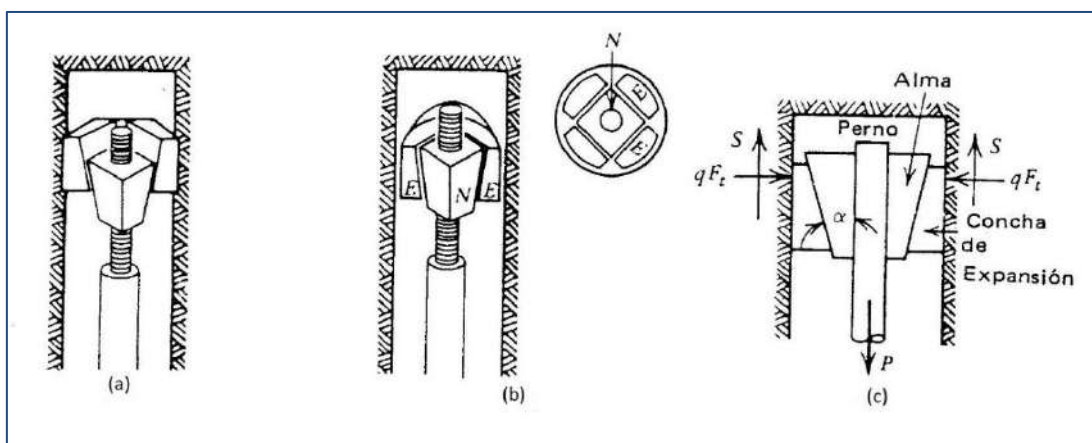


Figura 27. Barra con Concha de Expansión  
Fuente: Hobst (1983)

iii) *Barras helicoidales.* Las barras helicoidales, son barras de acero de sección ovalada, con resaltes en forma de un hilo helicoidal izquierdo en toda su longitud, como puede apreciarse en la figura 28, donde además, la figura 28(a) muestra la cola de la barra helicoidal, cuyo extremo termina en un corte diagonal para facilitar su penetración en el mortero con que se instale (cartuchos de cementicio y/o resina o, lechada); mientras que la figura 28(b), muestra la cabeza de la barra provisto de la tuerca de ajuste de las placas con las que se instalan. Como cualquier otro tipo de perno, las barras helicoidales se instalan previamente perforando los taladros, acorde con su longitud, donde se introducen los morteros de acoplamiento, para finalmente introducir propiamente las barras por rotopercusión para que se penetre y haga el batido del mortero. Luego del curado del mortero, se fija coronando la cabeza de la barra con una placa, ajustándola con una tuerca de fundición

nodular, que ilustra la figura 28(b), la placa incrementa su radio de acción y permite mantener la resistencia natural del macizo rocoso.

De acuerdo a su tipo: se tienen grupos, los anclajes de barra, cuyos diámetros varían entre 16 y 50 mm y, longitudes entre 1 y 12 m, se pueden unir unos con otros con coplas. Como ejemplo puede apreciarse en la tabla 6, las especificaciones técnicas de las barras helicoidales que comercializa Prodac. La figura 29 ilustra una barra helicoidal de 7 pies de longitud (2,10 m). Es de destacar que, las barras helicoidales se instalan en conjunción con un material de acoplamiento o mortero como resina, cementicio o lechada de cemento.



Figura 28. Barra Helicoidal. (a) Cola. (b) Cabeza

Fuente: Elaboración propia.

Tabla6

Especificaciones Técnicas de las Barras Helicoidales

Descripción/Diámetro	22 mm	25 mm	32 mm
Fluencia (kN)	200	263	425
Resistencia a la tracción (kN)	270	350	564
Resistencia al corte (kN)	200	263	425
Límite de Fluencia (kg/cm <sup>2</sup> )	5,27	5,27	5,27
Alargamiento mínimo (%)	7	7	7
Masa por metro (nominal) (kg)	2,85	3,85	6,03
Menor diámetro de la barra (mm)	20,6	23,0	30,3
Mayor diámetro de la barra (mm)	21,4	24,4	30,6
Diámetro exterior (mm)	24,6	30,6	34,8

Fuente: Prodac

- *Barras helicoidales instaladas con resina.* En este caso, a los taladros perforados de acuerdo la longitud de las barras helicoidales, se introducen un número suficiente de cartuchos de resina dentro de los taladros, de tal forma que, al introducir las barras, el espacio anular entre la barra y la pared del taladro quede completamente relleno

y el mortero quede adherido en la pared del taladro y de la propia barra. Las barras se introducen por rotoperCUSión de los equipos de perforación o emperadoras, a fin que los componentes de resina y catalizador se mezclen, produciéndose el fraguado de 1 a 5 minutos (hasta 90 minutos en algunos casos); es de destacar que, el tiempo de fraguado o curado también depende de la temperatura del ambiente, así, para -5 °C fragua en unos 4 minutos, mientras para 35 °C tan sólo en 25 s. La velocidad de rotación debe mantenerse en 60 RPM. La longitud máxima de la barra es de 12 m, puesto que, para longitudes mayores, la mayoría de las perforadoras no tienen la capacidad para hacerlo rotar y hacer un adecuado mezclado de los componentes de la resina. Una de las principales desventajas de este sistema es su alto costo.



Figura 29. Barra Helicoidal de  $\Phi$  22 mm y 7 Pies de Longitud  
Fuente: Elaboración propia.

- *Barras helicoidales instaladas con cemento.* Es el método de mayor aplicación como sostenimiento permanente, por su facilidad de instalación y bajo costo. Se puede aplicar en el reforzamiento de una gran variedad de suelos y rocas. Provee una adecuada protección a la barra de la corrosión, generalmente la relación agua/cemento oscila entre 0,4 y 0,45, lo cual permite su bombeo en pequeños diámetros y se obtiene mortero de alta resistencia. La relación adecuada entre los diámetros de los taladros y el anclaje debe ser entre 0,4 y 0,6. La sección longitudinal y transversal de la parte cementada en el terreno es determinado usualmente bajo el supuesto que existe cohesión uniforme del cemento sobre el área de contacto, tanto en la barra como en el terreno. El área de contacto, y consecuentemente también las dimensiones de la parte anclada, son determinados de la simple relación entre la fuerza de tensión,  $P$ , y la fuerza promedio de cizallamiento en la superficie de la parte cementada, donde este último se considera de forma cilíndrica regular:

$$mP = \pi \cdot d_2 \cdot l \cdot \tau_b$$

o entre la fuerza  $P$ , y fuerza de adherencia entre el cemento y la superficie de los componentes de acero de la sección de raíz del anclaje.

$$mP = n \cdot \pi \cdot d_1 \cdot l \cdot \tau_a$$

Donde:

$m$  = Factor de seguridad (1,4 – 2)

$d_1$  = Diámetro de la sección cementado del tendón de anclaje

$d_2$  = Diámetro del taladro

$n$  = Número de componentes de acero en la raíz

$l$  = Longitud de fijación de la raíz del anclaje

$\tau_b$  = Fuerza de adherencia entre el cemento y roca o suelo (magnitud de trabajo)

$\tau_a$  = Fuerza de adherencia entre cemento y el acero.

- *Adherencia en la interface cemento – roca* . Un aspecto importante en la instalación de las barras helicoidales es la adherencia del mortero tanto en la pared del taladro y la propia barra, siendo los principales mecanismos de esta adherencia, la Adhesión que viene a ser la tensión de adherencia producido por la interconexión físico química de partículas del mortero empleado con la rugosidad de la superficie de contacto. Otro es el rozamiento, la adhesión se anula conforme aumenta la carga aplicada. La interacción mecánica, conforme se incrementa la carga aplicada, el comportamiento se modifica, aumentando considerablemente el deslizamiento de la barra debido al fisuramiento interna, por lo que, en esta fase, el nivel de confinamiento influye considerablemente, al igual que el recubrimiento, la cuantía de armadura transversal, nivel de tensión, etc. (Ruiz, 2012) y (Adherencia entre el hormigón y el acero, 2012).

La adherencia entre el cemento y la pared del taladro depende de la resistencia de la roca y el cemento, la rugosidad de las paredes del taladro, la limpieza de los taladros, y el área de contacto entre el cemento y la roca. La resistencia aproximada de la adherencia cemento – roca es determinada en el laboratorio, utilizando testigos de taladros de anclaje o de taladros exploratorios. El núcleo se coloca dentro de un molde de acero resistente relleno con lechada hasta un nivel predeterminado. Después de al menos siete días de endurecimiento, el núcleo es presionado fuera del molde en una prensa de laboratorio. Las fuerzas de adhesión obtenidas de esta manera suelen ser algo superiores a los encontrados en pruebas de campo porque el área de contacto en la prueba de laboratorio es mucho menor, pero particularmente porque el núcleo se expande bajo compresión en lugar de contracción, como lo sería bajo tensión. Suponiendo que la resistencia de la lechada es 42 MPa, la resistencia máxima de adherencia sería entonces 4,2 MPa, y la resistencia de adherencia admisible es 1,4 MPa, tomando un factor de seguridad de 3, Coats refiere a un valor máximo de trabajo de 2,45 Mpa para la resistencia de adherencia, pero con un factor de seguridad de



1,75. Por lo tanto, la máxima resistencia es la misma (4,3 MPa). Para las rocas débiles y parcialmente alteradas es más correcto tomar la adherencia máxima de 20 a 35 por ciento de la resistencia a la compresión de la roca (Hobst & Zajíc, 1983).

Koch sugiere valores de trabajo para la adherencia de entre 0,35 y 0,70 MPa para rocas sueltas, 0,70 y 1,05 MPa para rocas de dureza intermedia, y 1,05 y 1,4 MPa para rocas muy duras. De acuerdo al estándar australiano, un valor de 1,05 MPa es satisfactorio para la mayoría de las rocas duras. La meteorización de las rocas reduce significativamente su resistencia de adherencia con comento. Las mediciones más confiables de la resistencia de adherencia son las obtenidas en las pruebas de arranque. El valor promedio para la capacidad máxima del anclaje dividido por un factor de seguridad de 1,5 a 3,5, es usado en el diseño del anclaje. Un factor de seguridad inferior puede utilizarse para rocas compactas y duras y para anclajes temporales, mientras que un mayor factor de seguridad debe ser aplicado para rocas débiles, diaclasadas o alteradas y para anclajes permanentes. La tabla 7, lista los valores de adherencia obtenidos en las pruebas de campo para diferentes tipos de roca en diferentes lugares. Los valores máximos no pudieron obtenerse en todos los casos. Parecía que, para rocas similares, los valores de adherencia variaron considerablemente. Esta variación surgió de las desviaciones locales y las irregularidades en la estructura geológica del macizo rocoso, de los diferentes detalles de diseño de las pruebas de anclaje, de los diferentes métodos de perforación y el barrido, así como de las diferentes presiones usados en el cementado de las raíces del anclaje de prueba (Hobst & Zajíc, 1983).

- *Cohesión entre la lechada y el suelo.* Cuando el anclaje se lleva a cabo en suelo, el punto débil de la fijación es la interfaz entre la superficie del anclaje y el suelo. La resistencia al arranque del anclaje en suelo está determinada por la resistencia a la cizalla (fuerza de fricción) en la interface suelo/anclaje, este valor puede expresarse por la relación de Coulomb:  $T = \sigma \cdot \tan \phi + c$  (Hobst & Zajíc, 1983).

En suelos sin cohesión la resistencia de adherencia del cemento/suelo es normalmente mayor que la resistencia de cizalla del suelo, y es posible determinar la resistencia de la cizalla alrededor del anclaje usando los parámetros obtenidos para el suelo. Las pruebas de tracción de anclajes fijados en suelo han demostrado que la resistencia a la tracción es generalmente superior a la calculada del esfuerzo máximo de cizalla alrededor del anclaje.

Tabla 7

*Valores de la Adherencia Roca/Cemento encontrado en pruebas de campo*

<u>TIPO DE ROCA</u>	<u>Resistencia de adherencia de prueba (Mpa)</u>	<u>Resistencia máxima de adherencia (Mpa)</u>
Granito	0,81; 1,24; 1,72	
Basalto	0,72; 1,0; 3,6	6,67
Arenisca	0,4; 0,84; 0,95; 0,98; 1,2; 1,56; 1,58	1,73
Caliza	1,42	2,83; 4,56; 4,80
Caliza (margoso)	0,63	
Caliza (fisurada)	1,19	
Caliza (con bandas de marga)	0,55	
Dolomita	1,66	1,8
Lutita	0,88	
Marga	0,21; 0,28; 0,36	
Pizarra		0,63
Pizarra y arenisca	0,10	
Pizarra (fuertemente alterada)		0,39
Tiza		0,7
Cuarcita	1,02; 1,32; 1,72	
Brecha	0,93	
Pizarra	0,90; 1,24	1,8
Pizarra y grauvaca	1,4	
Mica esquistosa	0,65; 0,80; 0,92	
Mica esquistosa (muy sana)	2,16	
Mica esquistosa y gneis	0,80	
Meta toba (alterada)	0,29	

Fuente: Hobst et al. (1983)

iv) *Pernos Autoperforantes.* El perno autoperforante, es una barra hueca similar a una barra de perforación para el paso del agente de barrido o el material de acoplamiento como el cemento o resina, como ilustra la figura 30, donde se puede apreciar las características de los componentes de estos pernos. Asimismo, tiene rosca estándar continua izquierda en toda su longitud de amplio paso como ilustran las figuras 30(a) y 30(b) laminados en frío. En su extremo frontal lleva un elemento de corte provisto de agujeros de barrido por los que sale el agente de barrido o mortero. Están diseñados para el sostenimiento de terrenos incompetentes que tienen baja cohesión como arenas, rellenos inconsistentes, terrenos intensamente fracturados, escombros entre otros. La rosca continua de las barras, facilita el acoplamiento sucesivo de barras usando coplas o manguitos, posibilitando la instalación de anclajes profundos de acuerdo al requerimiento del terreno (Sistema

autoperforante DSI Underground, 2017). Como cualquier otro perno, estas barras se coronan con planchuelas, ajustándolas contra la roca con una tuerca, como puede apreciarse en la figura 30(b).

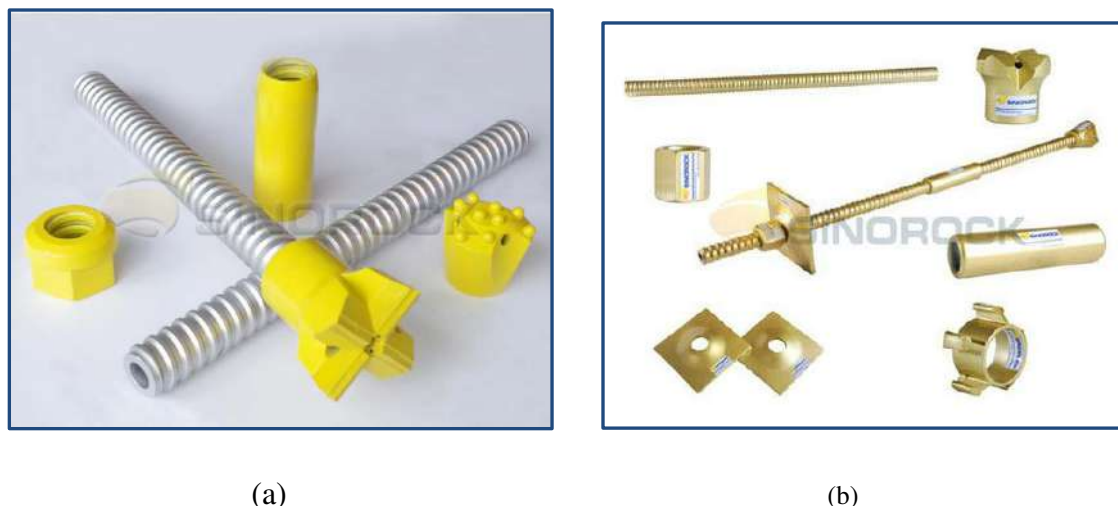


Figura 30. Pernos Autoperforantes SINOROCK. (a) Mostrando sus Componentes. (b) Mostrando el Paso de Rosca Continua y los Agujeros de los Elementos de Corte.

Fuente: Recuperada de <https://spanish.alibaba.com/p-detail/Perno-autoperforante-roca-varilla-roscada-Sinorock-r32-300004757154.html>

Los pernos autoperforantes se comercializan en longitudes de 1,0 a 6,0 m en incrementos de 0,5 m, en la tabla 8, se puede apreciar como ejemplo las características técnicas de los pernos autoperforantes comercializadas por Prodac.

El perno autoperforante MAI SDA de Atlas Copco; puede instalarse en una gran variedad de Suelos y en terrenos deleznales, así como portales y losas de base. Aplicaciones asociadas con obras subterráneas incluyen: anclaje radial para la estabilización de túneles durante la excavación con el modelo NATM; como forepoles o spiles para la protección del avance de la excavación; como la base de la pila por la carga de reacción de arcos de acero; y para la estabilización de taludes y portadas de túnel (Atlas Copco, 2003).

**B) Pernos inflables.** Estos pernos se fabrican de tubos de acero, que primero son aplanados y luego rolados con la finalidad de reducir su diámetro, como puede apreciarse en la figura 31, que corresponde a la pila de tubos enrolados en el proceso de fabricación de los pernos Swellex de Atlas Copco. Este proceso se realiza para facilitar su introducción dentro de los taladros durante el proceso de instalación, los extremos se sellan con manguitos como ilustra la figura 32, donde en la parte superior se presenta la vista de un perno X-Pandabolt de 7 pies, al centro Hydrabolt de 6 pies y en la parte inferior al Swellex de 5 pies. A la

derecha de la Figura se observan las cabezas de estos pernos, que quedan fuera del taladro sujetando a las planchuelas y son las que portan los agujeros por donde se inyecta agua durante su inflado y a la izquierda las colas que van al fondo de los taladros.

Tabla 8

*Características Técnicas de los Pernos Autoperforantes de Prodac*

ROSCA	Diam. Exterior (mm)	Diam. Interior (mm)	Carga de rotura (KN)	Resistencia a la tracción (N/mm <sup>2</sup> )	Límite elástico (KN)	Peso unitario (kg/m)
R25N	25	14	210	806	600	2,3
R32N	32	18,5	280	720	560	3,0
R32S	32	15	350	740	570	3,5
R38N	38	19	500	700	540	4,8
R51L	51	36	550	690	580	5,6
R51N	51	33	800	840	670	7,6
T76N	76	51	1500	880	600	16,5
T76S	76	45	1900	790	630	19,0

Fuente: Elaboración propia

Una vez colocado los pernos inflables dentro de los taladros, se inflan inyectando agua con bombas de alta presión (25 – 30MPa), a través de los agujeros que tienen en sus cabezas, como pueden apreciarse en las figuras 33 (a) y 33 (b), donde la figura 33 (a) muestra la cabeza del perno Swellex en cuyo manguito se aprecia el orificio para inyección de agua; mientras que la figura 33(b) muestras las válvulas de inyección de agua de los pernos Hydrabolt y X-Pandabolt. Gracias a la presión de inflado, estos pernos al tratar de recuperar su forma original se acoplan y se presionan contra la pared de los taladros en toda su longitud. La resistencia contra cualquier desplazamiento de este tubo de anclaje fijado en la roca es debido a la fricción entre la roca y la pared del tubo a lo largo de toda su longitud. Pernos de este tipo son indicados usualmente como pernos de fricción. Un tipo especial de perno, fijado en el taladro a lo largo de toda su longitud de 2 m por inflación de un tubo de acero con agua a alta presión fue presentado como Swellex por Atlas Copco AB. El Swellex se fabrica de un tubo de acero de 41 mm de diámetro, que es remodelado mecánicamente para adquirir un diámetro de tan solo 28 mm, tal como puede apreciarse en el lado izquierdo la figura 34(a).

Los manguitos son presionados en los extremos y sellados con soldadura. Uno de los manguitos retiene el agua y tiene un pequeño orificio para inyectar el agua durante su rápida instalación dentro del taladro. Como el diámetro de los taladros (30 a 39 mm) son menores que el diámetro original del tubo, se genera una lengüeta en el lado plegado del perno, tal como puede apreciarse en el lado derecho de la figura 34(a). Esta lengüeta actúa como un

resorte cuando se libera la presión de agua, y produce fuerzas radiales que presionan el perno contra las paredes del taladro. Durante el proceso de inflado, la longitud del perno se reduce debido a la contracción, obligando a la planchuela del perno acoplarse en la pared de roca. Se puede instalar 50 pernos por hora, según Atlas Copco (Hobst & Zajíc, 1983).



*Figura 31. Pila de Tubos Rolados Durante el Proceso de Fabricación de los Pernos Swellex*  
Fuente: Atlas Copco.



*Figura 32. Pernos Inflables. Parte Superior: X-Pandabolt de 7'. Centro: Hydrabolt de 6'. Inferior: Swellex de 5', Mostrando su Cabeza y Cola en Forma de Manguito.*  
Fuente: Elaboración propia.

La figura 34(b) ilustra a un perno inflable seccionado, donde la figura del lado izquierdo corresponde a la sección del perno antes del inflado (perno nuevo), mientras que la del lado derecho muestra la sección del perno completamente inflado (al aire libre), se puede observar que la sección del perno adquiere la forma de la huella de un plantígrado. Actualmente, existe una variedad de este tipo de pernos en el mercado.



Figura 33. Agujeros para inyección de agua en pernos inflables. (a) En los Swellex. (b) Hydrabolt (izquierdo) y X-Pandabolt (derecha)

Fuente: Elaboración propia.



Figura 34. Perno inflable seccionado. (a) Antes y después de inflado en tubo de 38 mm de diámetro. (b) Antes y después de inflado al aire libre

Fuente: Elaboración propia.

**C) Pernos de constricción – Split Set.** Los Split Sets, llamados también pernos de fricción, son pernos de roca muy simples, que constan de un tubo ranurado en toda su longitud, en su cola (que va al fondo del taladro), tiene una conicidad para facilitar su penetración dentro de los taladros durante la instalación; y, en la cabeza (que queda fuera del taladro) lleva una brida o collarín de 8 mm de diámetro soldado (similar a un O-ring), cuya finalidad es sujetar las placas o planchuelas con las que se corona, como puede apreciarse en la figura 35 (International Rollforms, 2018).

Los Split Sets, son pernos de roca que se instalan únicamente con 2 componentes, el perno mismo y la planchuela. Con la placa de apoyo en su lugar, estos pernos se introducen dentro de los taladros de diámetro ligeramente menor por la percusión del equipo de perforación. A medida que el tubo del perno se desliza en su lugar, toda la longitud de la ranura se estrecha, como puede apreciarse al lado derecho de la figura 36, que ilustra a un

Split Set seccionado antes y después de instalado dentro de un tubo de acero de 38 mm de diámetro, haciendo que la presión radial se ejerza contra la roca en toda su longitud de contacto (International Rollforms, 2018).



*Figura 35. Split Set Mostrando sus Partes*

Fuente: Elaboración propia.

Este tipo de pernos de fricción es comúnmente producido bajo el nombre comercial de Split Set introducido por Ingersoll-Rand Co. Americano de acuerdo al diseño de J.J. Scot. Estos pernos se comercializan en longitudes de 0,9 a 2,44 m (3' a 8') en incrementos de 0,3 m (1').



*Figura 36. Split Set Seccionado. A la Izquierda, se Muestra el Ancho de la Ranura Original y a la Derecha, Introducido Dentro de un Tubo de 38 mm de Diámetro se Observa la Reducción del Ancho de la Ranura*

Fuente: Elaboración propia.

### **2.6.3 Materiales de acoplamiento para pernos de barras rígidas.**

**A) Cartuchos de resina.** Los cartuchos de resina constituyen uno de los materiales de acoplamiento de las barras helicoidales, constituido de un compuesto tixotrópico de una pasta de resina poliéster y un catalizador químico, separados por un



diafragma a lo largo de los cartuchos (Mintech, 2014) como ilustra las figuras 37 (a) y 37(b). Estos cartuchos, se colocan uno tras otro dentro de los taladros perforados de una profundidad apropiada acorde con la longitud de la barra a instalar; luego con la ayuda de la perforadora rotopercutiva (jackleg o jumbos), se introduce la barra helicoidal dentro de la masa de los cartuchos, gracias a la percusión del equipo, que a medida que se va penetrando, rompe los envoltorios plásticos, uno tras otro. Simultáneamente, la rotación de la barra, hace el batido y mezclado de los componentes de los cartuchos. Al mezclarse los componentes contenidos en los cartuchos, se produce una reacción química cuya rapidez depende de la velocidad de rotación de la barra. Luego del mezclado de los componentes, se tiene una masa de aspecto muy similar al del concreto (Remicsa, 2015) y (prodac, 2019).



(a)



(b)

*Figura 37. Cartuchos de Resina Lokset. (a) Cajas Conteniendo los Cartuchos de Resina. (b) Cartucho Seccionado Mostrando sus Componentes Separados por un Diafragma.*

Fuente: Elaboración propia.

En el Mercado se tienen resinas de distintas velocidades de fraguado: Ultra rápido fragua en 30 s, rápido en 1 min y lento 3 – 5 min. Es de destacar que la velocidad de fraguado depende también de la velocidad rotación de la barra durante su instalación. Entre sus características Técnicas se pueden citar: Resistencia a la tracción 20 – 25 MPa, resistencia a la compresión 90 – 120 MPa, módulo de elasticidad 12000 MPa, densidad promedio Aprox. 2000 Kg/m<sup>3</sup>. Es importante almacenar los cartuchos bajo techo, en un lugar seco y ventilado



a una temperatura no superior a 20°C, no se debe exponer directamente al sol. Las temperaturas extremas afectan la vida útil de los cartuchos de resina, establecido en un año si se almacena en su empaque original y bajo condiciones antes indicadas (minova, 2011).

**B) *Cemento portland.*** “El cemento Portland es un conglomerante o cemento hidráulico que cuando se mezcla con agregados, agua y fibras de acero discontinuas y discretas tiene la propiedad de conformar una masa pétreo resistente y duradera denominada hormigón. Es el de mayor aplicación en construcción y es utilizado como aglomerante para la preparación del hormigón (llamado concreto en varias partes de Hispanoamérica). Como cemento hidráulico tiene la propiedad de fraguar y endurecer en presencia de agua, al reaccionar químicamente con ella para formar un material de buenas propiedades aglutinantes. Fue inventado en 1824 en Inglaterra por el constructor Joseph Aspdin. El nombre se debe a la semejanza en aspecto con las rocas que se encuentran en la isla de Portland, en el condado de Dorset. Suele poseer un color gris pizarra intenso o bien un color marfil pálido (en cuyo caso se hace llamar cemento blanco)” (Cemento portland, s.f.).

El empleo del cemento en sostenimiento de rocas es variado, como: Concreto armado, concreto prefabricado (dovelas), shotcrete (seco o húmedo), inyecciones, lechada como acoplamiento de barras rígidas, mezcladas con agregados (cartuchos de cementicio). Asimismo, el cemento también se utiliza en la preparación de relleno hidráulico y en pasta, que se aplican en minas subterráneas donde la explotación se realiza aplicando métodos con relleno como son el caso de “Corte y Relleno”, Cámaras y Pilares con relleno, entre otros.

*Tipos de cemento portland.* El conocimiento sobre el cemento es bastante difundido, tanto sobre su composición, características y su comportamiento, los que permiten fabricar cementos con diferentes propiedades. La clasificación más usada se encuentra en la norma ICONTEC 30, basada en las normas ASTM (American Society for Testing and Materials) (Loma Negra, 2016). En el mercado se encuentran 5 tipos de cemento portland: El tipo I, es el cemento más comúnmente usado en obras de concreto en general (Edificios, estructuras industriales, sostenimiento, etc.). Este tipo de cemento libera más calor de hidratación que los otros tipos de cemento, la figura 38 ilustra este tipo de cemento producido por Cemento Andino en Perú. El Tipo II, se caracteriza por su moderada resistencia a los sulfatos, es el cemento Portland destinado a obras de concreto en general y obras expuestas a la acción moderada de sulfatos o donde se requiera moderado calor de hidratación, cuando así sea especificado, son ejemplos de aplicación de este tipo de cemento portland: Puentes, tuberías de concreto, entre otros. Los cementos portland del Tipo III, tienen alta resistencia inicial,

como cuando se necesita que la estructura de concreto reciba carga lo antes posible o cuando es necesario desencofrar a los pocos días del vaciado. El Tipo IV, se aplica cuando se requiere que el calor de hidratación no cause dilataciones durante el curado. El cemento portland Tipo V, se aplica cuando se requiere una resistencia elevada a la acción concentrada de los sulfatos, como es caso de los canales, alcantarillas, obras portuarias, entre otros (Cemento portland, s.f.) y (El concreto, 2009)

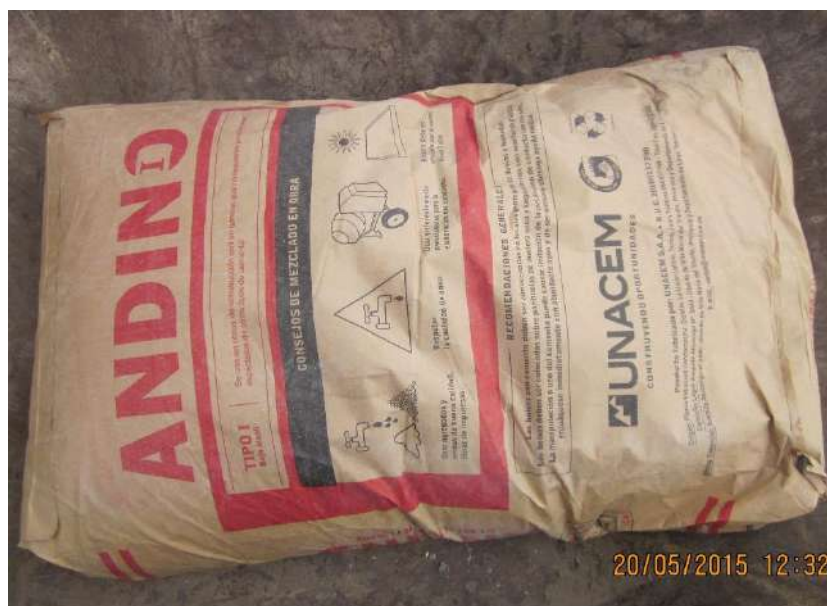


Figura 38. Cemento Portland Tipo I de Cemento Andino (Perú)  
Fuente: Elaboración propia.

En el caso del sostenimiento con pernos de barras rígidas, este material de acoplamiento se introduce dentro de los taladros, preparando una pasta mezclando con agua y bombeando, de tal forma que, una vez rellanado los taladros se introducen las barras. En caso de los pernos auto perforantes, se inyecta durante la perforación en vez agente de barrido de modo que, una vez terminada la penetración de toda la barra, ésta queda en esa posición, que luego del curado es coronado con una planchuela y ajustado contra la roca con una tuerca.

**C) Cartuchos de cementicio.** El cementicio es una mezcla de cemento con arena y aditivos para reducir su tiempo de curado. Se presentan empaquetados en envoltorios plásticos en forma de cartuchos como puede apreciarse en la figura 39(b), los envoltorios plásticos tienen perforaciones en toda su longitud, cuya función es permitir el paso del agua al cementicio, a fin de humedecerlos antes de colocarlos dentro de los taladros, durante el proceso de instalación de las barras. Se comercializan en cajas de cartón como ilustra la

figura 39(a), que corresponde a los cartuchos de cementicio “Rem – bolt” producidos por Fabricem SRL. Para la instalación de los pernos, estos cartuchos se remojan en agua por espacio de 5 a 10 min (castem, 2019), luego de humedecidos se introducen dentro de los taladros uno tras otro, en número adecuado para rellenar completamente el espacio anular entre las paredes del taladro y la barra. Las barras se introducen dentro de los cartuchos utilizando equipos de perforación rotopercutivos, la percusión del equipo permite que la barra se penetra dentro de los cartuchos rompiendo sus envoltorios plásticos, mientras que la rotación hace el batido del cementicio, de tal forma que quede uniformemente mezclado y acoplado.



(a)



(b)

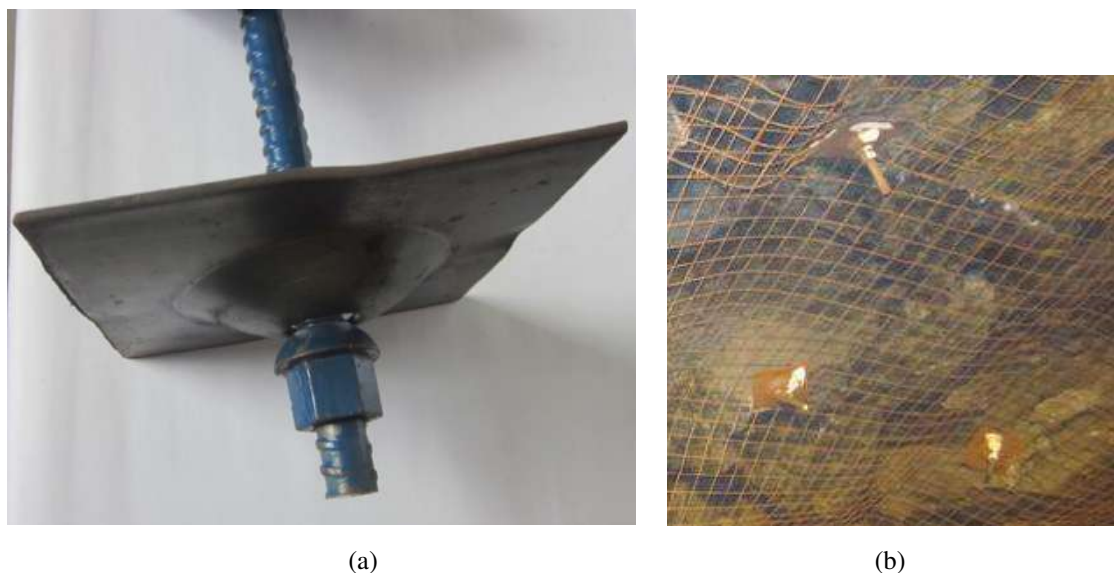
*Figura 39. Cartuchos de Cementicio Rem-Bolt. (a) Presentación de los Cartuchos de Cementicio. (b) Cartuchos de Cementicio Antes de su Remojo en Agua*

Fuente: Elaboración propia.

**2.6.4 Placas para pernos de roca.** Cuando se instalan los pernos de roca, se coronan con una placa o planchuela y se presionan o ajustan contra la roca con la cabeza de los mismos pernos o tuercas como ilustra la figura 40, donde la figura 40(a) corresponde a una barra helicoidal antes de su instalación en posición de sostenimiento coronada con una placa, la misma que está sujeta con una tuerca y, la figura 40(b) muestra a tres barras

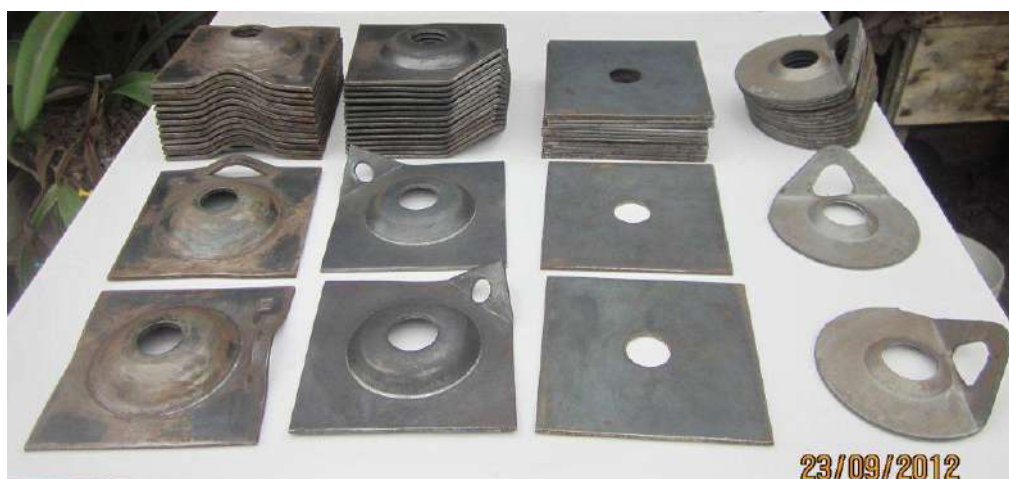
helicoidales instalados en terreno fracturado, donde las placas están sujetando a la malla de acero electrosoldada.

La función de las placas es incrementar el radio de acción de los pernos, para sostener bloques inestables y también sirven para sujetar otros elementos de sostenimiento como las mallas y cables instalados en terrenos deleznales. Existen distintos tipos, tamaños y formas de placas, como: cuadradas, circulares refileadas o no en su borde. Asimismo, pueden ser planas o con una protuberancia en su centro, como ilustra la figura 41. La protuberancia puede ser tipo domo, piramidal, elíptica, cónica o toroidal. Las dimensiones de las placas van de 100 x 100 a 300 x 300 mm, construidas de plancha de acero de 2 á 16 mm de espesor. El diámetro del agujero perforado en el centro de la placa, depende del diámetro del perno con que se instale (Giraldo, 2014) y (Giraldo, 2015).



*Figura 40. Barra Helicoidal Mostrando su Planchuela y Tuerca. (a) Antes de su Instalación. (b) Instalado con Malla de Acero Electro soldada*  
Fuente: Elaboración propia.

El estudio llevado a cabo en el Laboratorio de Materiales de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUC), sobre Las placas con protuberancias tipo domo son las que demuestran tener mayor resistencia a la deformación. Para las pruebas de compresión llevadas a cabo en la PUCP, las resistencias mostradas por distintas placas son: Python (109,68 KN), Expanbolt (72,34 KN), Esquinadas Hydrabolt (41,56 KN) y Refiladas Hydrabolt (40,56 KN) (Giraldo, 2015) y (Giraldo, 2014).



*Figura 41. Distintos Tipos de Planchuelas para Pernos de Roca*  
Fuente: Elaboración propia.

### **2.6.5 Rendimiento de los pernos de roca (capacidad de anclaje).**

#### **A) Procedimiento para medir la capacidad de anclaje de los pernos de roca.**

Para medir el rendimiento o capacidad de anclaje de los pernos de roca, se sigue un procedimiento ya estandarizado, que consta de los siguientes pasos:

a) Ubicar un área de pruebas, normalmente en el hastial de una galería a una altura de 0,90 a 1,20 m de altura para facilitar la instalación de los pernos y el manipuleo de los equipos de prueba. Es importante conocer la geología y las propiedades geomecánicas del terreno, de esta área.

b) Perforación de los taladros de un diámetro sugerido por el fabricante o proveedor, considerado como el diámetro óptimo; la profundidad de los taladros está en función de la longitud de los pernos en prueba.

c) La instalación de los pernos, es un proceso que depende del tipo de perno del que se quiere determinar su capacidad de anclaje. Por ejemplo, en caso de las barras helicoidales con cartuchos de cementicio, es pertinente remojar primero los cartuchos en agua al menos por 10 minutos antes de introducirlos en los taladros; si es con cartuchos de resina, éstos se introducen directamente. La barra se introduce dentro del mortero con la ayuda de los equipos de perforación rotopercutivos, con la finalidad que la percusión permita a la barra penetrarse en el mortero y la rotación hace el batido para uniformizar el mortero y se acople completamente entre la pared de los taladros y la misma barra. En caso de los pernos inflables como los Swellex, éstos se introducen directamente en los taladros y se



procede con su inflado hasta una presión de 25 a 30 MPa. Los Split Sets, se instalan únicamente por percusión, evitando transmitirle la rotación, usando para ello un adaptador.

d) En caso de las barras helicoidales y autoperforantes, es necesario esperar el curado del mortero con que se instalan. En caso de las resinas, el tiempo de fraguado varía de segundos a algunos minutos, mientras que de los cementicios algunas horas. Si se instalan con lechada de cemento sin acelerador, el fraguado es cercano a un mes. En caso de los pernos mecánicos, inflables y de constricción, el anclaje es inmediato.

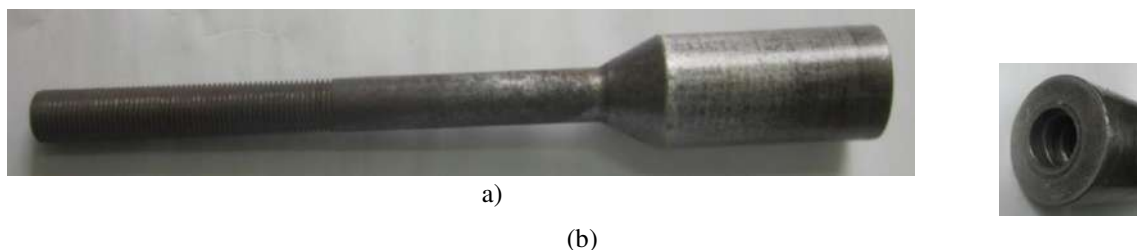
e) Estando anclado los pernos, se procede a ensamblar el equipo de arranque (pull test) que ilustra la figura 42. Este equipo está conformado por cilindro de vástago hueco (al margen izquierdo de la Figura), por donde pasa el espárrago que sujeta el gancho de mordaza y queda ajustado sobre el cilindro. Como puede observarse en esta Figura, el cilindro está conectado mediante una manguera de impulsión a la bomba hidráulica manual (parte inferior de la Figura), entre un extremo de la manguera y la bomba hidráulica se instala un manómetro que da la lectura de la carga que se va aplicando en cada pulso de bombeo.



Figura 42. Equipo de Arranque para Medir la Capacidad de Anclaje de los Penos de Roca  
Fuente: Elaboración propia.

f) Seguidamente, se hace el montaje del cilindro del equipo de arranque sobre la torre o castillete sujetando con una espiga o espárrago. La Figura N° 43, ilustra como ejemplo el espárrago diseñado y construido para realizar las pruebas de arranque de barras helicoidales, donde en la figura 43(a), se aprecia hacia la izquierda la rosca para ajustar el

cilindro hidráulico con el perno mariposa y al extremo derecho (de mayor diámetro) donde se enrosca la cabeza de la barra helicoidal. La figura 43(b), corresponde a la vista frontal del espárrago, donde se enrosca la barra helicoidal, hacia el interior se puede observar la rosca hembra.



*Figura 43. Esparrago Diseñado para las Pruebas de Arranque de Barras Helicoidales. (a) Vista de Planta, al Lado Izquierdo se Observa la Rosca para Enroscar el Perno Mariposa. (b) Vista Frontal, se Observa los Filetes Internos donde Encajan las de las Barras Helicoidales*  
Fuente: Elaboración propia.

La figura 44 (a) y (b) muestran los montajes del cilindro sobre la torre, sujetado por el espárrago y ajustado con la tuerca mariposa durante las pruebas de arranque en el laboratorio y campo (mina). La figura 44(a), corresponde al ensayo en el laboratorio, donde la torre (castillete) está en posición vertical, la barra helicoidal se enrosca en la parte inferior del espárrago de tal modo que el eje del perno en prueba queda colineal con el eje del espárrago que atraviesa el vástago hueco del cilindro; por el extremo superior se ajusta con el tuerca mariposa. En el campo las pruebas son más tediosas, por cuanto la superficie rocosa tiene muchas irregularidades, por lo que las torres en su base tienen pernos y tuercas para posicionar adecuadamente el cilindro y mantener alineado el eje del perno con el espárrago como puede apreciarse en la figura 44(b); en esta figura también cabe destacar que, el espárrago es una barra simple con rocas en ambos extremos, el extremo que va adelante se enrosca al gancho que sujeta a la arandela de la barra helicoidal retenida con su tuerca. Cabe destacar que, existen distintos tipos de torres y ganchos de acuerdo al perno ensayado.

g) Una vez posicionado el cilindro hidráulico, nivelado la torre y ajustado adecuadamente el perno mariposa, quedando completamente tensionado el perno, se procede a accionar la bomba manual, por cuyo efecto el vástago hueco del cilindro empuja al espárrago, el que a su vez, trata de jalar al perno fuera del taladro. El bombeo sigue hasta que la lectura en el manómetro deja de ascender, al valor picoalcanzado, a cuyo valor se considera la capacidad de anclaje de un perno.



Figura 44. Pruebas de Arranque de Barras Helicoidales. (a) En el Laboratorio. (b) en el Terreno  
Fuente: elaboración propia.

h) Los valores de las cargas parciales o máximas, se registran para análisis posteriores. Asimismo, se registra la elongación de los pernos, usando para ello un vernier.

**B) Capacidad de anclaje de los pernos de roca.** En el año 2011, el autor realizó un estudio comparativo de la capacidad de anclaje de 4 tipos de pernos de roca: Swellex, Hydrabolt, Split Sets y barras helicoidales instalados con cartuchos de cementicio y cartuchos de resina. Por cada perno se probaron 4 longitudes efectivas de anclaje, LEA (1, 2, 3 y 4 pies) y por cada longitud se probaron 3 a 4 muestras, totalizando 64 muestras. Los pernos se instalaron y se midieron sus capacidades de anclaje, siguiendo el procedimiento detallado arriba. Estos ensayos se llevaron a cabo en la mina Reliquias de la Cía. Minera Castrovirreyna (Huancavelica, Perú), siendo el tipo de terreno con  $RMR = 48$ , es decir clase III con un tiempo de auto sostenimiento de 3 a 7 días, siendo la roca andesita, según datos reportados por el Departamento de Geomecánica de dicha Cía. Los equipos de perforación (jackeleg, bomba hidroneumática), aceros de perforación, personal (perforistas, ayudantes y apoyo), servicios (aire comprimido, agua y alumbrado) y todas las facilidades durante el tiempo que demandó el estudio, fueron proporcionados por la Cía. Asimismo, adaptadores para instalar los pernos fueron proporcionados en calidad de préstamo por Aceros Arequipa, los mismos que ilustra la figura 45, donde la figura 45(a), corresponde al adaptador para su instalación, en cuyo extremo izquierdo se observa una forma idéntica a la culata y collarín de una barra de perforación de sección hexagonal para transmitir la rotación y percusión de



una perforadora jackleg; al extremo derecho, se observa propiamente el adaptador, es donde embona la cabeza de la barra helicoidal, tiene una sección ovalada igual que de la barra helicoidal pero ligeramente más grande para transmitir la rotación y percusión a la barra, pero sin ajustarse de modo que al finalizar la instalación de la barra, puede extraerse con facilidad. El equipo de arranque fue facilitado por New Concept Mining, el mismo que se ha ilustrado en las figuras 44 (a) y 44 (b) (Giraldo, 2012) y (Giraldo, 2011).



(a)

(b)

*Figura 45.* Herramientas utilizadas para las pruebas de Barras Helicoidales. (a) Adaptador para su instalación con perforadora jackleg. (b) Jalador para las pruebas de arranque (Aceros Arequipa)

Fuente: Elaboración propia.

Los taladros donde se instalaron los pernos, se perforaron con diámetros indicados por el fabricante o proveedor, diámetros únicos para cada tipo de perno. Tal es así que, para los Split Sets, Swellex e Hydrabolt, los taladros se perforaron con diámetro de 38 mm, mientras que para las barras helicoidales 36 mm. Los Split Sets se instalaron con las mismas perforadoras utilizadas para la perforación de taladros (Jackleg), aprovechando únicamente su percusión, neutralizando su rotación gracias a un adaptador construido expresamente para este fin. Los pernos Swellex e Hydrabolt (pernos inflables), se introdujeron dentro de los taladros e inflaron con una bomba hidroneumática, hasta alcanzar la presión recomendada por los fabricantes. Para instalar las barras helicoidales, se usaron dos tipos de material de acoplamiento, cartuchos de cementicio CEMCON Normal de 30x305 mm que cura en 24 horas y los cartuchos de resina GROUND LOCK de fragua rápida de 1 – 3 minutos. Cabe destacar que, antes de introducir los cartuchos de cementicio dentro de los taladros se remojaron en agua por espacio de 15 a 25 minutos, para luego introducirlos dentro de los taladros uno tras otro a razón de 1 cartucho por pie de taladro, finalmente, se introdujeron las barras helicoidales con la ayuda de las mismas perforadoras jackleg, cuya percusión facilitaba su penetración dentro de los cartuchos rompiendo el envoltorio plástico y la rotación hacía el batido para homogenizar el mortero y acoplarlo a las paredes de los taladros y la propia barra. Para el caso de las barras helicoidales instaladas con cartuchos de

resina, estos cartuchos se introducen directamente dentro de los taladros, dado que no requieren ser remojados u otros tratamientos, los pasos siguientes son idénticos que para el caso anterior (Giraldo, 2012).

Una vez instalados los pernos, se procedió con las pruebas de arranque. Se estableció una secuencia de pruebas de acuerdo al tipo de perno, tal es así que, primero se realizaron los ensayos con los Split Sets (perno de constricción), seguido por los Hydrabolt y Swellex (pernos inflables); cabe reiterar que, las pruebas de arranque (pull test) de estos pernos pueden llevarse a cabo inmediatamente después de concluida su instalación. Finalmente, se hicieron las pruebas de las barras helicoidales, después de un período de tiempo, muy por encima de los tiempos de fraguado de los morteros especificados por el fabricante, que puede ser de unos minutos a muchas horas. Tal es así que, las pruebas de arranque se realizaron después de transcurrido muchas horas por encima del tiempo de fraguado, empezando por las barras helicoidales instaladas con cartuchos de resina, finalizando con las instaladas con cartuchos de cementicio. La figura 46, corresponde al equipo de arranque de New Concept Mining utilizado en el estudio, donde la figura 46(a) ilustra el equipo completo, antes de las pruebas de arranque. Al lado izquierdo, se observa la torre portando al cilindro en su base superior, asimismo el espárrago que conecta a la mordaza (color metal) al cilindro (color amarillo) ajustado con el perno mariposa, asimismo hacia el centro de la torre (color anaranjado) se observa la mordaza (gancho) para el arranque de los pernos Hydrabolt, al lado derecho de la figura se observa la bomba manual y hacia el centro el manómetro para la lectura de la carga aplicada con la bomba manual. La figura 46 (b), Corresponde a las pruebas de arranque de un Split Set, durante los ensayos preliminares en la Mina Condestable, previo a las pruebas en Castrovirreyna (Giraldo, 2012).

Durante las pruebas de arranque, los datos se registraron en los formatos diseñados para este estudio. Las cargas, se registraron de las lecturas en el manómetro en intervalos de 1 y 2 ton, hasta un valor máximo, que se considera la capacidad de anclaje para una determinada longitud efectiva de perno. Asimismo, para cada intervalo de carga aplicada, se registraron las elongaciones en mm usando para la medición un vernier. Los resultados de la capacidad de anclaje de los pernos estudiados en Castrovirreyna, se presentan en la tabla 9 y la figura 47. Cabe destacar que, los valores presentados en la tabla, corresponden a los valores ajustados de las cargas tomadas en el campo, de acuerdo a la calibración del equipo de arranque en la Universidad Nacional de Ingeniería.



(a)



(b)

Figura 46. Equipo de arranque utilizado en Castrovirrey. (a) En la planta de New Concept Mining, mostrando todos sus componentes. (b) Durante las pruebas en la Cía. Condestable  
Fuente: Elaboración propia.

Tabla9

Capacidad de Anclaje de Distintos Tipos de Pernos de Roca en Función de la Longitud Efectiva de Anclaje

Longitud efectiva de anclaje (pies)	Capacidad de anclaje de pernos de roca (ton)				
	Split Set	Barra Helicoidal		Hydrabolt	Swellex
		Instalado con cartuchos de cementicio	Instalado con cartuchos de resina		
1	2.25	10.50	1.13	13.50	6.75
2	3.75	8.00	4.31	15.75	11.00
3	4.50	14.00	14.63	16.25	12.25
4	6.00	12.25	15.75	16.00	14.25

Fuente: Elaboración propia

Otra hipótesis que quedó demostrado, es que la capacidad de anclaje de cualquier perno, no guarda una relación lineal con su longitud, como solía considerarse antes de este estudio, puesto que es una relación cuadrática y en cada caso las curvas se tornan asintóticas entre 3 y 4 pies de longitud efectiva de anclaje (LEA). Por consiguiente, para calcular la longitud total del perno, se debe sumar a la LEA la altura de la cuña o potencia de bloque inestable a sostener, las longitudes muertas de los pernos y las irregularidades de la superficie del terreno que impide el adecuado posicionamiento de las placas con las que se instalan los pernos (Giraldo, 2012).

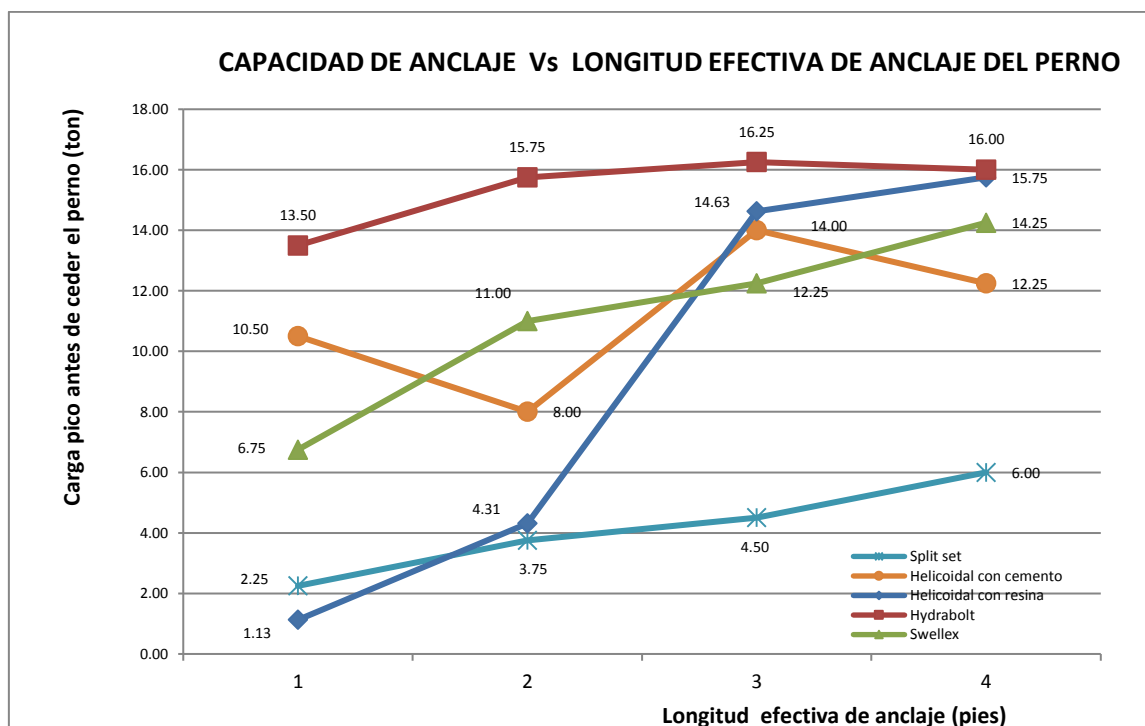


Figura 47. Capacidad de Anclaje de Distintos Pernos en Función de la Longitud Efectiva de Anclaje.  
Fuente: Giraldo (2012).

**C) Elongación de los pernos.** Las elongaciones de los pernos estudiados, se midieron a partir del desplazamiento del vástago del cilindro utilizando un vernier. Se analizaron las elongaciones para cada longitud efectiva de anclaje (LEA), presentándose como ejemplo lo correspondiente a 4 pies de LEA, como ilustra la figura 48, donde se observa que el perno que muestra mayor elongación, es el Split Set, seguido por la barra helicoidal instalado con cartuchos de resina, y el perno que menos se elonga es el Swellex (Giraldo, 2012). Estos resultados del estudio en Castrovirreyna, condujeron a las siguientes conclusiones:

- Realizar las pruebas de arranque en una operación minera, demanda de muchos requerimientos como: Disponibilidad de un área de pruebas, equipos y maquinaria, personal, logística, facilidades de alojamiento y alimentación; lo que en conjunto representa un alto costo para la empresa.
- La capacidad de anclaje de los pernos de roca no guarda una relación lineal con su longitud, se manifiestan ascendentes hasta 3 y 4 pies de longitud efectiva de anclaje. Por encima de esa longitud efectiva de anclaje, declina la capacidad de anclaje hasta convertirse asintótica. Esto significa que, utilizar longitudes por encima de éstas, es innecesario.

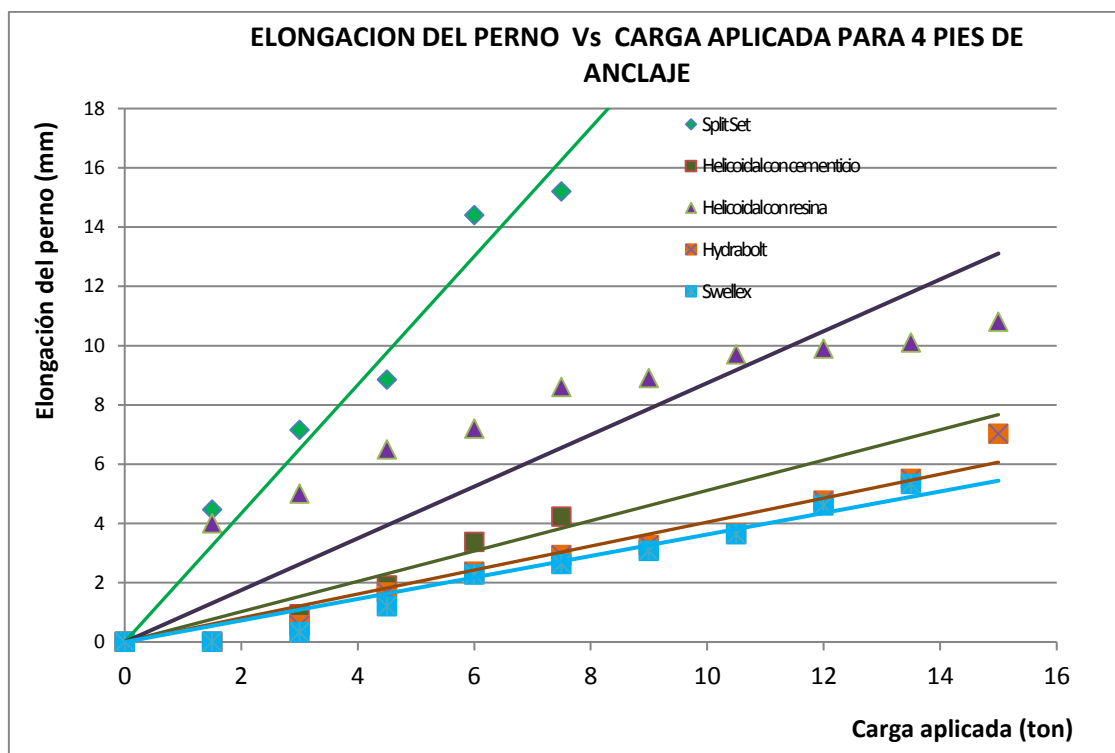


Figura 48. Elongación de los pernos estudiados en Catrovirreyna en función de la carga aplicada para una longitud efectiva de anclaje de 4 pies

Fuente: Elaboración propia.

- Los pernos Split Sets (perno de constricción), Hydrabolt y Swellex (pernos inflables), muestran un anclaje más uniforme y ascendente como aumenta la longitud efectiva de anclaje. Mientras que las barras helicoidales, muestran anclajes irregulares, sobre todo cuando se instalan con cartuchos de cemento.
- El perno que muestra mayor capacidad de anclaje es el Hydrabolt, seguido por los Swellex. Esta ventaja comparativa del Hydrabolt radica en que, el agua con el que se infla queda retenida en su interior a una presión de 25 MPa, haciendo que la pared exterior del perno se acople mejor en la pared del taladro permanentemente, ejerciendo fuerzas radiales en toda su longitud, lo cual no ocurre con los Swellex y sus similares, puesto que después de su inflado, la presión del agua se descarga hasta nivelarse con la presión atmosférica.
- La capacidad de anclaje de las Barras Helicoidales, está influenciado en forma determinante por el material de acoplamiento, tal como muestran los resultados del estudio, estos pernos muestran mayor y mejor capacidad de anclaje cuando se instalan con resina.

- La elongación de los pernos, tiende a guardar una relación lineal con la carga aplicada. El perno de soporte definitivo que tiene mayor elongación es la Barra Helicoidal y el menor corresponde al Hydrabolt.

Atlas Copco ha introducido una nueva herramienta para medir el rendimiento total de los pernos de roca, y un nuevo parámetro capaz de combinar la capacidad de anclaje y la elongación. Como la deformación es expresado en porcentaje (%) en el gráfico clásico carga - deformación, similar a lo ilustrado en la figura 19. Atlas Copco ha introducido el concepto Work Index (WI), como el trabajo real definido como la carga total en función de la deformación, representado por el área bajo la curva que ilustra la figura 49. Atlas Copco, considera que el índice de trabajo (WI), da una verdadera imagen de la energía total absorbida por el perno antes de romperse o perder su función. La capacidad de carga define normalmente un tipo de perno de roca. Por ejemplo, el Swellex Standard es un perno de 100 kN, mientras que el Super Swellex está en la categoría de 190 kN. Pero otros parámetros pueden influir en el rendimiento final de un perno de roca y especialmente su contribución a la seguridad. La experiencia en operaciones mineras y tuneleras ha demostrado que la elongación es un parámetro muy importante para juzgar el rendimiento de un perno. En minas profundas, áreas de concentración de tensión, carga irregular, deformación progresiva y roca triturada, todos estos casos, un perno con una capacidad superior para seguir la deformación de la roca puede jugar un papel importante para equilibrar y corregir el campo de tensión para la estabilidad. Pero la elongación sin resistencia a la tracción está simplemente fuera de lugar. La tabla 10, presenta la elongación y el work index de distintos tipos de pernos (Minova, 2009).

Tabla 10

*Elongación de Distintos Tipos de Pernos de Roca*

TIPO DE PERNO	CARGA DE TENSION	ELONGACION (%)	WORK INDEX (kN x %)
Mechanical rock bolt*	180	14	2520
Rebar*	180	15	2700
Split Set SS39/SS46*	110	16	1760/2608
Twin cement grouted cables*	500	4,8	2400

\*Ref. Rock bolting manual by B. Stillborg

Fuente: Atlas Copco

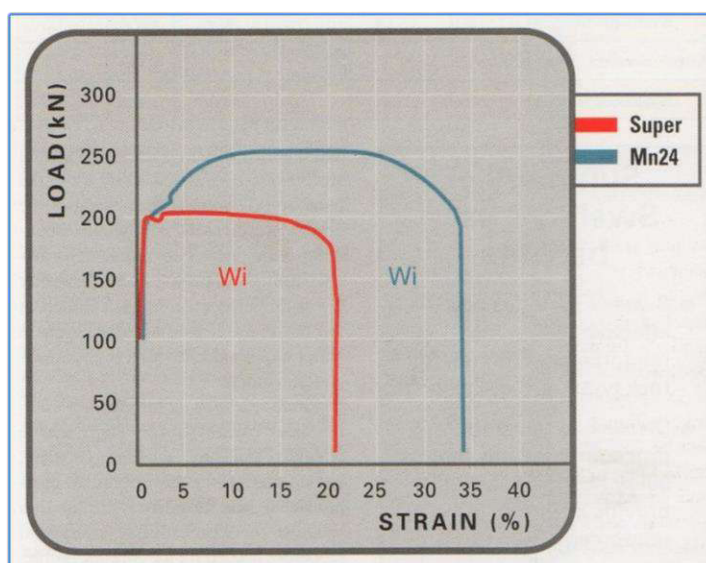


Figura 49. Work Index de los Pernos Swellex Según Atlas Copco

Fuente: Atlas Copco.

## **Capítulo 3**

### **Marco Metodológico**

Para materializar el presente estudio, se tuvo que idear una metodología que posibilite estudiar y analizar entre otros aspectos, la capacidad de anclaje de los pernos de roca, bajo las mismas condiciones de terreno y diámetros de taladros en los que se instalan; imposibles de encontrar en una operación de excavación minera o civil. Por lo cual, se hicieron pruebas piloto para determinar si la metodología ideada funcionaría o no para llevar a cabo todas las pruebas y con la variedad de pernos de roca que demandaría el estudio. Los taladros se simulaban con tubos de acero y el terreno con una mesa ideada y construida con este propósito, pero ello implicaba también otros problemas, como la instalación de los pernos dentro de los tubos, dado que, en una operación, se realizan con equipos de perforación, que no estaban disponibles para este estudio. Situación que se superó alquilando equipos y contratando personal necesario. Comprobado el funcionamiento de la metodología ideada, se prosiguió con los preparativos, realización de las pruebas, y todos los pasos siguientes, como se detallan en este capítulo.

#### **3.1 Construcción y Acondicionamiento del Laboratorio de Pruebas**

Antes de proceder propiamente con los ensayos, materia del presente estudio, fue necesario preparar todos los requerimientos directos e indirectos que intervinieron en el desarrollo del presente estudio, entre otros: Preparación de sitio para las pruebas, construcción de mesa para pruebas de arranque y construcción de la mesa para instalar pernos u otros usos.

**3.1.1 Diseño y construcción de mesa para pruebas de arranque de pernos.** Se trata de una mesa metálica que sustituye el hastial de una excavación, donde se realizan las pruebas de arranque para determinar la capacidad de anclaje de los pernos de roca. El diseño de esta mesa facilita la instalación, prueba de arranque y desinstalación después de cada

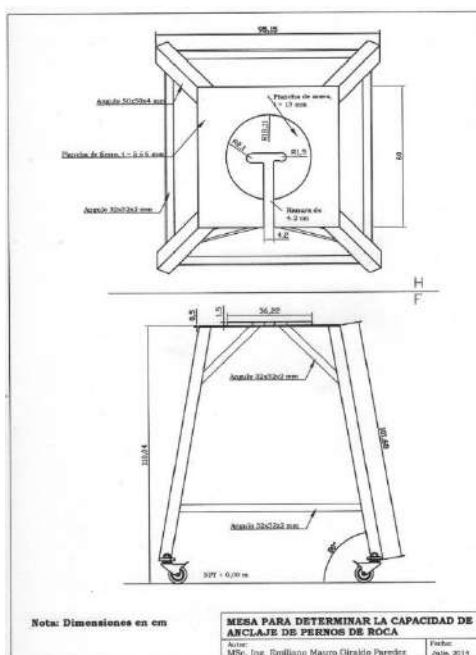


prueba de cualquier tipo de perno de roca. La mesa está construida completamente de fierro y acero, salvo los jebes de las ruedas; consta de 4 patas que terminan en igual número de ruedas con una inclinación de  $80^\circ$ ; en conjunto conforman un tronco piramidal para tener estabilidad durante los ensayos de arranque. La mesa propiamente, consta de una plancha cuadrada de 60 cm de lado y 5 mm de espesor, sobre la cual, centrado lleva un disco o plato de acero endurecido de 36,22 cm de diámetro y 15 mm de espesor, para soportar las cargas de compresión durante las pruebas. Tiene una altura de 110,04 cm, para facilitar el montaje y desmontaje del equipo de arranque (torre, mordaza, esparrago y cilindro hidráulico) en cada prueba de arranque.

El diseño de esta mesa en AutoCAD ilustra la figura 50 (a), donde se observa que tiene 2 ranuras ortogonales entre sí en forma de “T”. La primera ranura, inicia en el borde de la mesa con un ancho de 42 mm hasta el centro, que sirve para introducir los pernos para su ensayo y luego retirarlos al finalizar la prueba. La segunda ranura, transversal a la anterior, tiene dos anchos, a la izquierda 42 mm y a la derecha 38 mm; que sirven para hacer las pruebas de arranque de distintos tipos de pernos. Las 4 patas están unidas unos con otros con ángulos de fierro de 1,5 pulgadas y 2 mm de espesor, para su mayor estabilidad y solidez. Asimismo, el lado ranurado de la mesa, se ha reforzado con el mismo tipo de ángulo a dos patas contiguas de la mesa, con la finalidad de evitar su deformación durante los ensayos. La figura 50 (b), ilustra la mesa ya construida, lista para instalar los pernos para las pruebas de arranque.

**3.1.2 Diseño y construcción del pozo y losa para las pruebas.** Para facilitar la instalación de pernos cuyas longitudes superen a la altura de la mesa (1,104 m), se diseñó y construyó un pozo coronado con una losa de concreto. La figura 51 (a), ilustra el tubo de PVC de 4” de diámetro instalado en pozo de 0,60 m de diámetro por 1,6 m de profundidad, para mantener fijo el tubo PVC en posición vertical, se relleno con concreto, que luego fue coronado con una losa también de concreto de 2 x 2,30 x 0,20 m, protegiendo la boca del pozo con una tapa de registro de 4” como muestra la figura 51 (b). Cada vez que se realizan las pruebas de arranque de pernos de longitud superior a 1,104 m, se retira la tapa de registro para introducir la cola de los pernos dentro del tubo PVC instalado en el pozo, como puede apreciarse en la figura 52, que corresponde a una de las pruebas de arranque con pernos de 1,20 m (4 pies), se observa parte del perno (cola) introducido dentro del pozo. Cabe destacar

que, esta estructura fue construida en la sede de la EP de Ingeniería de Minas de la UNMSM, con la colaboración de un albañil y alumnos de dicha Escuela.



(a)



(b)

Figura 50. Mesa para Determinar la Capacidad de Anclaje de los Pernos de Roca. (a) Diseño en AutoCAD. (b) Construido de Fierro y Acero, Listo para las Pruebas de Arranque  
Fuente: Elaboración propia.



(a)



(b)

Figura 51. Construcción de Pozo y Losa de Concreto para Facilitar las Pruebas de Pernos de Roca. (a) Instalación del Tubo PVC de 4" Dentro del Pozo. (b) Losa Coronando el Pozo con Tapa de Registro.  
Fuente: Elaboración propia.

Para evitar la exposición a la intemperie de los colaboradores, equipos y materiales, el área de la losa se ha protegido parcialmente, techando con material reciclado recolectado dentro del Campus de la UNMSM, como maderas, tablas, calaminas, etc. como puede observarse parcialmente en la figura 52.

**3.1.3 Diseño y construcción de la mesa para instalar los pernos dentro de los tubos simuladores y otros.** La instalación de los pernos inflables, se llevó a cabo en la planta de la Cía. New Concept Mining, por requerirse de bombas de alta presión, compresor, adaptadores y accesorios, que no estuvieron disponibles ni en alquiler, dado que se tratan de equipos estacionarios.



*Figura 52.* Equipo de Arranque Montado sobre la Mesa para Determinar la Capacidad de Anclaje de Pernos Posicionado sobre la Losa con Parte del Perno Dentro del Pozo.

Fuente: Elaboración propia.

La instalación de los Split Sets, requiere de un equipo de percusión como las perforadores o martillos, equipos que para su accionamiento requieren de aire comprimido (compresor), equipos que tampoco estuvieron disponibles, razón por la cual, se instalaron

con combas de diferentes tamaños, pero para la mayor eficacia de los impactos, estos pernos deberían mantenerse en posición vertical, lo cual fue posible gracias a la mesa para instalar pernos, que ilustra la figura 53.

Las barras helicoidales, se instalan por rotopercusión utilizando equipos que produzcan estos dos efectos simultáneamente (caso de las perforadora rotopercutivas, que también requieren de aire comprimido para su accionamiento), en todas las combinaciones de barra helicoidal y mortero, se usaron rotomartillos eléctricos. Por lo cual, los compartimientos diseñados a un extremo de la mesa deberían ser suficientemente resistentes al torque generado por el equipo, como ilustra la figura 53.



*Figura 53. Mesa para la Preparación e Instalación de Pernos de Roca Dentro de los Tubos Simuladores*  
Fuente: Elaboración propia.

### **3.2 Equipos, Herramientas y Materiales Utilizados**

Los equipos y herramientas utilizados en el presente estudio, desde el acondicionamiento de los pernos y los tubos simuladores, instalación, pruebas de arranque

propiamente, ensayos después de las pruebas de arranque, análisis de las propiedades de los morteros de las barras helicoidales, son significativos.

### 3.2.1 Equipos.

A) *Martillo eléctrico GSH 11E*. Este equipo que se ilustra en la figura 54 (a), se usó durante la excavación del pozo para instalar pernos

Especificaciones:

Potencia absorbida:	1500 W
Energía de impacto:	16,8 J
Peso:	10,1 kg
Longitud:	570 mm
Altura:	270 mm

B) *Sierra de corte rápido Dewalt D28700*. Este equipo de corte llamado también tronzadora, se utilizó para cortar los Split Sets, y barras helicoidales en longitudes apropiadas para “longitudes efectivas de anclaje” de 1 á 4 pies, durante el acondicionamiento de los pernos. Asimismo, se usó después de las pruebas de arranque, para seccionar muestras de pernos para analizar los contactos, aberturas y el acoplamiento de los pernos en las paredes de los tubos simuladores. Ver figura 54 (b).

Especificaciones del equipo:

Amperios	15.0 AC/DC Amperios
Velocidad sin carga	3,800 rpm
Bloqueo del eje	Si
Prensa de traba rápida	Si
Eje de la rueda	1"
Diámetro de la rueda	14"
Capacidad máxima (redonda)	4 1/2"
Capacidad máxima (Rectangular)	4 x 7-3/4"
Guía de 45°	permite cortes angulares precisos

C) *Amoladora angular Bosch GWS 13-125 CIE*. Equipo utilizado para perfilar el pavimento de la losa y contornear la mesa para instalar los pernos. La figura 55, ilustra este equipo, tiene una potencia de 1300 W, velocidad: 2800 – 11500 RPM, disco de 125 mm.





(a)



(b)

Figura 54. (a) Martillo Eléctrico Bosch GSH 11 E. (b) Tronzadora DEWALT de 14" D28700

Fuente: Elaboración propia.



Figura 55. Amoladora angular Bosch GWS 13-125 CIE

Fuente: Elaboración propia.

D) *Rotomartillo GBH 5-40 DCE*. Este equipo se utilizó para instalar las barras helicoidales dentro de los tubos simuladores con cartuchos de cementicio y resina hasta 3 pies de longitud efectiva de anclaje (LEA). En la figura 56 (a), se puede observar a este rotomartillo con el adaptador embonada, listo para proceder con la instalación. Este equipo se alquiló de la tienda Sodimac de San Miguel, cuyas especificaciones técnicas, son:

Potencia absorbida	8,8 J
Energía de impacto	1.500 – 3.050 rpm
Número máx. de impactos con velocidad de giro nominal	170 – 340 r. p. m.
Velocidad nominal de rotación	

Peso	6,8 kg
Longitud	485 mm
Altura	260 mm
Intervalo de perforación	
Ø de perforación de hormigón, brocas de martillos perforadores	12 – 40 mm
Brocas de martillos perforadores	18 – 32 mm
Ø de perforación de hormigón, brocas para taladros pasantes	45 – 55 mm
Ø de perforación en hormigón con coronas perforadoras huecas	40 – 90 mm

E) *Rotomartillo Bosch GBH 11 DE.* Este rotomartillo de mayor potencia que el anterior, también se alquiló de Sodimac y se presenta en la figura 56 (b), donde se aprecia que tiene embonado el adaptador para instalar las barras helicoidales con cartuchos de cementicio y resina con longitudes de 4 pies de LEA.

Potencia absorbida	1500 W
Potencia de percusión	5 – 18 J
Velocidad	Variable 120 – 250 RPM
Golpes por minuto	1100 – 2250 GPM
Peso	11,1 kg
Longitud	595 mm
Altura	280 mm
Diámetro de perforación en hormigón para taladros pasantes	40 – 150 mm



(a)



(b)

Figura 56. Rotomartillo BOSCH de Sodimac. (a) Modelo GBH 5-40 DCE. (b) Modelo GBH 11 DE  
Fuente: Elaboración propia.

F) *Taladro eléctrico SKIL 6060.* Se utilizó para hacer las perforaciones durante el acondicionamiento del laboratorio y construcción de la mesa para instalar los pernos de roca. Ver figura 57.

Especificaciones técnicas:

Potencia:	600 W
Capacidad de perforación:	Acero (10 mm), madera (25 mm), hormigón (13 mm)
Rotación:	1 – 3000 RPM



Figura 57. Taladro Eléctrico Skil 6060

Fuente: Elaboración propia.

G) *Equipos utilizados en el taller metal mecánico.* Gran parte de los trabajos metal mecánicos se llevaron a cabo en el taller Metal Mecánico MUJIPRO, como equipos de corte, fresado y torneado, para construir las arandelas de tope y arranque, seccionamiento de pernos antes y después de las pruebas de arranque, para analizar las aberturas y contacto, acoplamientos y analizar las características de los morteros de las barras helicoidales, entre otros estudios pertinentes. La figura 58 (a) ilustra la sierra eléctrica seccionando a un perno inflable Hydrabolt después de su inflado para el análisis de aberturas y contactos. Asimismo, la figura 58 (b) muestra un torno electrónico durante la construcción de arandelas de tope y arranque.



(a)



(b)

Figura 58. Ejemplos de Equipos Utilizados en el Taller Metal Mecánico. (a) Sierra Eléctrica. (b) Torno Electrónico.

Fuente: Elaboración propia.

H) *Rugosímetro TR 220.* Este instrumento se ilustra en la figura 59 (a). Se utilizó para determinar la rugosidad de los morteros fraguados (cementicio, resina y lechada de cemento), luego de preparar convenientemente las correspondientes probetas en el



laboratorio de la EAP de Ing. Industrial, como se detalla en los correspondientes capítulos.

Sus principales especificaciones son:

Longitud de palpación:	DIN 4768, ISO 4287	1,5	4,8	15 mm
Rango de medida:				
Parámetro	Recorrido			
Ra, Rq:	0,005 – 16 $\mu\text{m}$			
Rz, Ry, Rp, Rt, R3z:	0,02 – 160 $\mu\text{m}$			
RSm, RS:	2 4000 $\mu\text{m}$			
Peso:	480 g			
Dimensiones:	141 x 56 x 48 mm			

I) *Durómetro portátil hardness tester TH 160*. Este instrumento pertenece al laboratorio de la EAP Ing. Industrial de la UNMSM, se usó para medir la dureza de los cementantes de los morteros de las barras helicoidales, sobre las probetas preparadas exprofesamente para este fin, ver figura 59 (b). Sus principales especificaciones son:

Escala de dureza:	HL, HRC, HRB, HRA, HV, HB, HS
Gama de resistencia a la tensión U.T.S.:	374 – 2652 MPa
Dispositivos opcionales de impacto:	DC, D+15, G, C, DL
Tiempo de trabajo continuo:	Cerca de 100 h
Dimensiones:	230 x 90 x 46 mm
Peso:	420 g



(a)



(b)

Figura 59. Equipos para Medir la Rugosidad y Dureza. (a) Rugosímetro TR 220. (b) Durómetro TH 160  
Fuente: Elaboración propia.

J) *Equipo Charpy*. Utilizado en el laboratorio de Ing. Industrial para estimar la resistencia al impacto y adherencia de los morteros de las barras helicoidales, las pruebas se hicieron dejando caer el péndulo de 3 ángulos: 50°, 60° y 70°. Ver figura 60.



*Figura 60. Equipo Charpy en la Facultad de Ing. Industrial*  
Fuente: Elaboración propia.

K) *Balanza analítica Z Ohaus triple beam TJ 261.* Esta balanza analítica manual, cuya precisión es de 0,1 g, se ilustra en la figura 61 (a) y pertenece a la EAP de Ing. Metalúrgica, con esta balanza se hicieron los pesajes para determinar la densidad de los morteros fraguados instalados con las barras helicoidales y el análisis de saturación con agua de los cartuchos de cementicio antes de su colocación en los tubos simuladores (cartuchos nuevos), para así determinar el tiempo óptimo de remojo de los cartuchos en agua. Asimismo, con esta balanza se hicieron los pesajes para determinar la relación agua / cemento en la preparación de la lechada de cemento para instalar las barras helicoidales.

Principales especificaciones:

Capacidad:	2610 g
Sensibilidad:	0,1 g
Peso neto:	3,2 g
Dimensiones:	50,8 x 25,4 x 20,4 mm

L) *Balanza analítica Adventures Z Ohaus AR 3130*- Es una balanza digital que ilustra la figura 61 (b) de propiedad de la EAP Ing. Metalúrgica, con una precisión de 0,001 g, con esta balanza se hicieron los pesajes para determinar la capacidad de absorción de agua por los morteros fraguados de las barras helicoidales. Principales especificaciones:

Capacidad:	310 g
Sensibilidad:	0,001 g
Potencia requerida:	8 – 14,5 V 50/60 Hz 6W
Tiempo de sensibilización:	3 s
Peso neto:	4,5 g
Dimensiones:	21,7 x 31 x 34,3 mm



(a)



(b)

Figura 61. Balanzas Analíticas de la EP Ing. Metalúrgica Z Ohaus. (a) Manual TJ 261. (b) Digital AR 3130  
Fuente: Elaboración propia.

M) *Horno mufla de 12 kW*. Es un horno eléctrico de la EAP de Ing. Industrial, se usó para hacer el tratamiento térmico de los morteros fraguados de las barras helicoidales, para así determinar sus comportamientos a diferentes temperaturas ensayadas. La figura 62, ilustra a esta herramienta, donde el personal encargado revisa el tablero eléctrico y el termostato antes de iniciar los ensayos correspondientes.

N) *Equipos de arranque*. Para realizar las pruebas de arranque de los pernos en estudio, se solicitó en calidad de préstamo a New Concept Mining (NCM) y a MINOVA (Prodac), puesto que el equipo de NCM tiene una capacidad de 20 ton, mientras que de Minova 30 ton; cuyas certificaciones de su calibración, se presentan en el Anexo B. La figura 63 ilustra el equipo de arranque de Minova. En resumen, se tuvo los siguientes componentes para ambos equipos:

- 2 Bombas hidráulicas manuales POWER TEAM.
- Dos gatas hidráulicas POWER TEAM una de 20 ton y otra de 30 ton.
- Manómetro ENERPAC modelo GF 813P escala RCH-202 (NCM).

- Manómetro Power Team N° 8085 (MINOVA).
- Torre, mordaza, esparrago y perno mariposa (MINOVA y NCM).



Figura 62. Horno Mufla de 12 KW en la Facultad de Ingeniería Industrial-UNMSM  
Fuente: Elaboración propia.

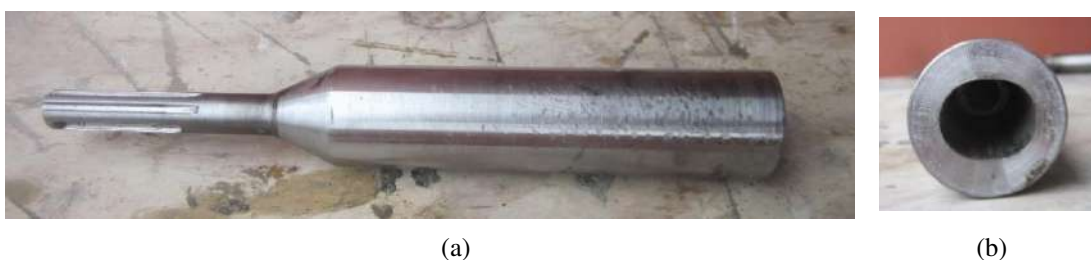
O) *Adaptadores.* Los adaptadores, son herramientas que hacen posible tanto la instalación como las pruebas de arranque de los pernos de roca. Estos dispositivos fueron diseñados por el autor y construidos en un taller metal mecánico. La figura 64, ilustra el adaptador para instalar las barras helicoidales, donde la figura 64 (a) muestra el adaptador vista de perfil donde las ranuras hacia su extremo izquierdo, es para embonar el rotomartillo GBH 11 DE, mientras que la figura 64 (b) muestra al adaptador visto de frente, se observa la sección ovalada del agujero, para el encaje con cierta holgura de la barra helicoidal y le transmita la rotación para batir el material de acoplamiento.

Asimismo, la figura 65 presenta el adaptador para instalar los Split Sets, donde la figura 65 (a) ilustra su parte frontal, que consta de una espiga para que encaja dentro del Split set y un collarín ranurado donde encaje la cabeza de estos pernos, para evitar su deformación durante su instalación y distribuir las fuerzas de impacto uniformemente. La figura 65 (b), muestra la parte trasera del adaptador en cuyo extremo se ha incluido la culata

de un barreno integral por ser un acero resistente al impacto, dado que, por este extremo se propinan los golpes durante la instalación de los Split Sets.



*Figura 63. Equipo de Arranque de Minova que Tiene una Capacidad de 30 ton*  
Fuente: Elaboración propia.



*Figura 64. Adaptador para la instalación de las barras helicoidales. (a) Vista de perfil. (b) Vista de frente.*  
Fuente: Elaboración propia.

La figura 66, corresponde al adaptador para hacer las pruebas de arranque de las barras helicoidales, donde la figura 66 (a) muestra una vista de perfil, que en su extremo izquierdo esta dotado de rosca macho de hilo fino para sujetar el cilindro hidráulico con una tuerca mariposa durante la pruebas de arranque. Por otro lado, la figura 66 (b), corresponde a la vista de frente del adaptador, en este extremo, tiene rosca hembra cuyo paso está de acuerdo al de la barra helicoidal, para enroscarlo y hacer la prueba de arranque.

#### *P) Torres para el montaje del equipo de arranque:*

Estas herramientas, posibilitan hacer el ensamblaje del equipo de arranque, es donde descansa el cilindro hidráulico con émbolo hueco y su base se apoya en el terreno, en el presente caso sobre la plataforma de la mesa.





Figura 65. Adaptador para instalar Split Sets. (a) Parte delantera. (b) Parte posterior  
Fuente: Elaboración propia.



Figura 66. Adaptador (espárrago) para hacer la prueba de arranque de las barras helicoidales. (a) Vista de perfil. (b) Vista frontal  
Fuente: Elaboración propia.

La figura 67, ilustra las diferentes torres utilizadas en el estudio; donde la figura 67 (a), ilustra la torre universal con asiento regulable, para posicionar adecuadamente el equipo de arranque en superficies irregulares, mediante los tornillos de ajuste, con esta torre se hicieron las pruebas de arranque de los Split Sets y parte de las barras helicoidales. La figura 67 (b), es una torre de base plana para su uso en terrenos regulares (planos), en el estudio se utilizó para hacer el arranque de parte de las barras helicoidales, como puede observarse, no tiene tornillos para regular su posicionamiento, esta figura corresponde a la prueba de arranque de barras helicoidales haciendo uso del adaptador ilustrado en la figura 66. Por

último, la figura 67 (c), corresponde a la torre cilíndrica regulable para hacer el arranque de los pernos inflables Swellex, Hydrabolt y X-Pandabolt.

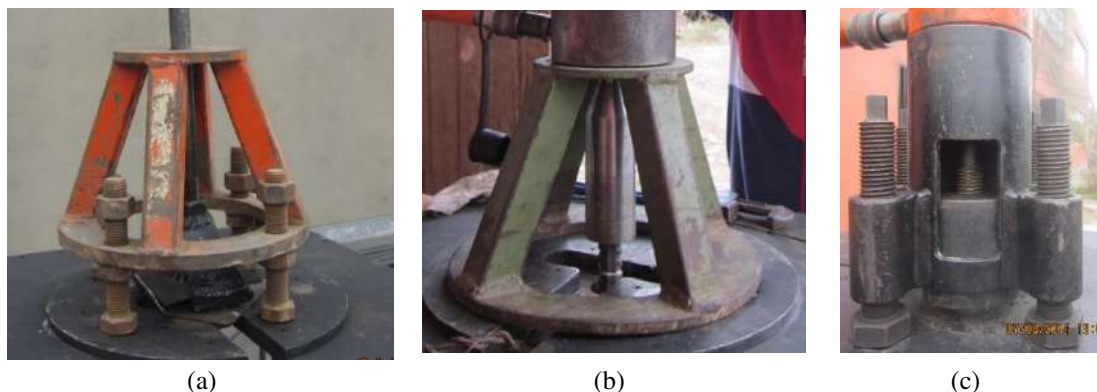


Figura 67. Torres para el Montaje del Cilindro Hidráulico. (a) Torre Universal con Asiento Regulable. (b) Torre Universal con Asiento Fijo. (c) Torre Cilíndrico con Asiento Regulable.

Fuente: Elaboración propia.

**Q) Mordazas.** Las mordazas, llamadas también ganchos, son piezas clave para materializar las pruebas de arranque, dado que son las que se conectan con el cilíndrico hidráulico mediante los espárragos y hacen la tracción de los pernos en prueba. Existen distintos modelos de acuerdo al tipo de perno, así, la figura N° 68 (a) corresponde a la mordaza para hacer las pruebas de arranque de barras helicoidales y otros pernos. La figura 68 (b), ilustra la mordaza está diseñado para hacer las pruebas de arranque de los Split Sets y la figura 68 (c), corresponda a la mordaza para hacer la prueba de arranque de los pernos inflables Hydrabolt y X-Pandabolt (Swellex). Estas piezas fueron proporcionadas en calidad de préstamo por la Cía. New Concept Mining.

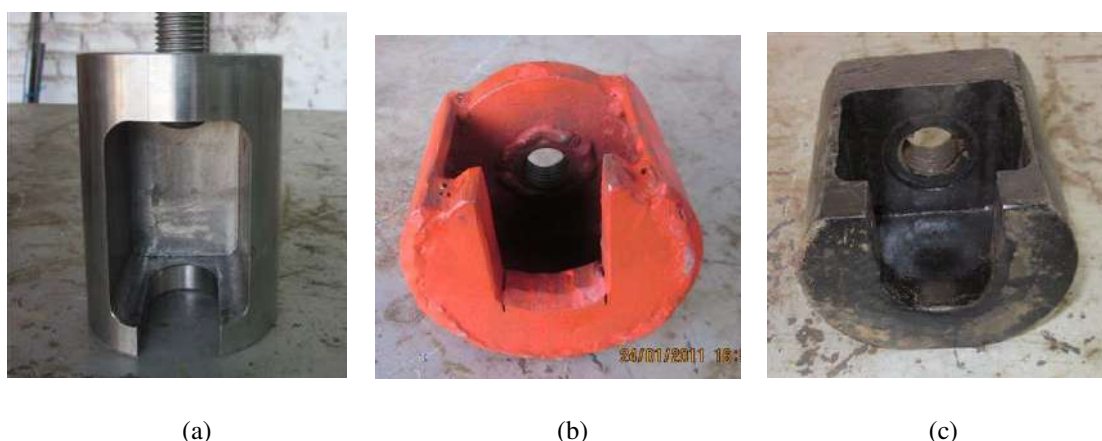


Figura 68. Mordazas para Enganchar la Cabeza de los Pernos Durante las Pruebas de Arranque. (a) Mordaza para el Arranque de Barras Helicoidales. (b) Mordaza para Split Sets. (c) Mordaza para Hydrabolt y Swellex (X-Pandabolt)

Fuente: Elaboración propia.

R) *Vernier digital Truper Caldi – 6 PM 0 – 6”*. Este instrumento se utilizó para calibrar los diámetros de los tubos simuladores y los pernos, dimensionar los contactos y aberturas generadas en los pernos inflables y Split Sets. Asimismo, para medir espesores de los envoltorios de los cartuchos de cementicio y resina, dimensionamiento de los poros formados en los morteros de las barras helicoidales, entre otros. Ver figura 69.



Figura 69. Vernier Digital Truper.

Fuente: Elaboración propia.

- S) *Equipo de cómputo*. CPU Samsung Intel Core i7 y periféricos.
- T) *Lap Top*. Toshiba Satellite, Intel Core i5.
- U) *Impresoras*. Epson L210, HP Deskjet 840C, Multifuncionales Canon PIXMA G3100 y G3110.
- V) *Cámaras fotográficas digitales*. CANON Power Shot SD1300 IS 12,1 Mega pixels y CANON SD 1300IS
- W) *Video Cámara*. Samsung SCD 86
- X) *Otros*. Calculadora Casio fx-991ES PLUS, cronómetro, etc.

### 3.2.2 Herramientas.

- A) *Disco de devaste*. 14” Y 6”. La figura 70, corresponde al disco de devaste Bosch de 14”, en total se consumieron 10 de estos discos.
- B) *Combas*. 20, 14 y 4 libras.
- C) *Adaptadores*. para instalar los Split Sets y barras helicoidales
- D) *Adaptadores*. para las pruebas de arranque de barras helicoidales (jalador)
- E) *Brocas*. Fierro y madera
- F) *Adaptadores*. Otros pernos.
- G) *Arco de sierra*.
- H) *Otras herramientas*. navajas, lengüetas de acero, flexómetro, alicates, destornilladores, etc.
- I) *Equipos de protección personal*. Guantes, máscaras, gafas, etc.
- J) *Calibrador de aberturas de acero inoxidable*.

### 3.2.3 Materiales.

- A) 6 Cajas de cartuchos de cementicio
- B) 6 Cajas de cartuchos de resina
- C) Bolsa de cemento Andino portland tipo I
- D) Disolventes (thinner)
- E) Productos de limpieza (waipe, trapo industrial, detergente, etc.)



- F) Útiles de escritorio (Papelería, marcadores, tintas, cintas masking tape, etc.)
- G) Materiales eléctricos (cables, lámparas, tomacorrientes, etc.).



Figura 70. Disco de Devaste Bosch de 14"

Fuente: Elaboración propia.

### 3.3 Tipo y Diseño de Investigación

**3.3.1 Tipo de investigación.** El presente trabajo de investigación es CUANTITATIVA Y EXPERIMENTAL; por cuanto su desarrollo demandó realizar ensayos de laboratorio y de campo, para hacer un análisis de la influencia del diámetro de los taladros sobre la capacidad de anclaje de los pernos de roca.

#### 3.3.2 Diseño de investigación.

A) **Pruebas de los pernos.** Luego de acondicionar el laboratorio de pruebas y preparado las mesas para instalar y hacer las pruebas de arranque de los pernos en estudio, se continuó con el desarrollo de las siguientes etapas del estudio.

i) **Preparación de los tubos simuladores.** Los tubos simuladores, simulan los taladros perforados en roca, con una serie de ventajas con respecto a los taladros reales: a) Simulan el mejor tipo de roca que puede hallarse en la naturaleza. b) Igualdad de condiciones para todos los pernos ensayados. c) Realización de cualquier cantidad de pruebas, imposibles de realizar en una operación. d) Evita la movilización de equipos, materiales y personal a una operación minera o civil. d) Reducción de costos por cada prueba. El rango de diámetros de los tubos simuladores oscila entre 32,5 y 42 mm.

La preparación de los tubos simuladores se llevó a cabo en un taller metal mecánico, donde fueron cortados de acuerdo al tipo de perno, en longitudes convenientes para hacer anclajes efectivos en 1, 2, 3 y 4 pies, como ilustra la figura 71. También, en dicho taller se prepararon las arandelas de tope que van soldados en uno de los extremos de los tubos simuladores, para un adecuado acoplamiento por debajo de la mesa de pruebas de arranque. Asimismo, las arandelas de arranque para acoplar la cabeza de los pernos en la mordaza del equipo de arranque. Los tubos simuladores correspondientes a los pernos inflables y los tubos de estrangulamiento, fueron trasladados del taller metal mecánico a la planta de New Concept Mining para proceder con la instalación de estos pernos. Mientras que, para el resto de los pernos, los correspondientes tubos simuladores, fueron trasladados a la sede de la EP de Ing. de Minas de la UNMSM.



*Figura 71. Tubos Simuladores para Distintas Longitudes Efectivas de Anclaje*  
Fuente: Elaboración propia.

i. *Preparación de los pernos en estudio:* Al igual que los tubos simuladores, los pernos también fueron acondicionados para que hagan anclajes efectivos de 1, 2, 3 y 4 pies. En caso de los Split Sets y las barras helicoidales, se prepararon en el laboratorio acondicionado en la sede de la EAP de Ing. de Minas, como muestra la figura 72 (a). La preparación de estos pernos, básicamente fue de corte con la tronadora Dewalt en tamaños convenientes para las longitudes antes indicadas, y, acondicionamiento de sus extremos para

facilitar su instalación, dentro de los tubos simuladores y/o mortero en caso de las barras helicoidales.

La preparación de los pernos inflables: Hydrabolt y X-Pandabolt (Swellex), fue diferente que los anteriores pernos, dado que no podían cortarse para las longitudes efectivas establecidas, es decir, deberían instalarse con su longitud total, debido a que sus extremos están sellados con bujes, donde uno de ellos porta la válvula de inflado, esta situación obligó idear la forma de evitar su expansión más allá de las longitudes efectivas de anclaje establecidos (dentro de los tubos simuladores), mediante tubos cuyo diámetro interior es lo más próximo al de los pernos, denominándose “tubos de estrangulamiento”, que fueron acondicionados en el taller metal mecánico. Estos tubos posibilitaron la realización de las pruebas de arranque de estos pernos sin inconvenientes. Al lado derecho de la figura 72 (b), inmediatamente después de los tubos simuladores se observan los tubos de estrangulamiento, vista captada durante los preparativos realizados en la planta de la Cía. New Concept Mining.



(a)



(b)

Figura 72. Preparación de los Pernos para las Pruebas. (a) Preparación de los Split Sets y Barras Helicoidales. (b) Preparación de los Pernos Inflables Hydrabolt y Swellex (X-Pandabolt).

Fuente: Elaboración propia.

ii) *Codificación de las muestras.* Con la finalidad de identificar con facilidad las muestras de pernos antes, durante y después de los ensayos de arranque, se establecieron los códigos que luego fueron marcados sobre los tubos simuladores en distintas posiciones (en forma reiterativa), como puede apreciarse en las figuras 73 (a) y 73 (b); con la finalidad de prevenir que si alguno de ellos se borrara por el manipuleo queden otros. La codificación se estableció, teniendo en cuenta el tipo de perno, el diámetro del tubo simulador, longitud efectiva de anclaje y el número de muestra. Por ejemplo, una barra helicoidal instalada con cartuchos de cementicio, se codificó del siguiente modo: BHCC-36-3'-3, donde BH significa

barra helicoidal, CC cartucho de cementicio, 36 es el diámetro interior del tubo simulador (36,5 mm), 3' es la longitud efectiva de anclaje (3 pies) y 3 representa el número de muestra. En caso de las barras helicoidales instaladas con cartuchos de resina y lechada de cemento, se codificó como BHCR y BHLC, respectivamente.



Figura 73. Codificación de las muestras de pernos de roca. (a) Marcado reiterativo de los códigos. (b) Parte de los tubos simuladores codificados en la sede de la EP Ing. de Minas - UNMSM

Fuente: Elaboración propia.

iii) *Instalación de los pernos en estudio:* Una vez preparado los tubos simuladores, los pernos y los tubos de estrangulamiento en caso de los pernos inflables y codificado adecuadamente las muestras, se procedió con su instalación de los pernos dentro de los tubos simuladores.

La instalación de los pernos inflables: Hydrabolt y X-Pandabolt, se llevaron a cabo en la planta de la Cía. New Concept Mining, firma que brindó las facilidades de equipos para la instalación de estos pernos. En cada caso se introdujeron los pernos dentro de los “tubos simuladores” y “tubos de estrangulamiento”, cuyas posiciones se marcaron con marcador blanco (liquid paper) para garantizar la precisión, sobre todo, de las longitudes efectivas de anclaje. Posicionado los tubos, se procedió con el inflado con la bomba hidroneumática de alta presión (25 MPa). La figura 74, muestra el inflado de los pernos inflables X-Pandabolt (Swellex), al margen inferior derecho de la figura se aprecia el extremo de la manguera provisto de un gancho que se acopla a la válvula del perno, por donde se inyecta el agua a la presión indicada.





*Figura 74. Instalación de los pernos inflables X-Pandabolt (Swelllex)*

Fuente: Elaboración propia.

Cabe destacar que, los pernos Hydrabolt, una vez inflados a la presión máxima, activan su válvula anti retorno (check), quedando atrapado en agua a dicha presión, mientras que en los X-Pandabolt (Swelllex), la presión se descarga hasta alcanzar la presión atmosférica, entonces a fin de que en su manipuleo posterior no cause inconvenientes, concluido el inflado se iban colocando con la cabeza hacia abajo para que el agua de inflado drene por completo. Culminada la instalación de estos pernos, fueron trasladados a la sede de la EAP de Ing. de Minas para realizar las pruebas de arranque.

En una operación de excavación, la instalación de los Split Sets, se lleva a cabo con las perforadoras rotopercutivas (jackleg o jumbos) con un adaptador que evita su rotación, de tal forma que el perno se introduce dentro de los taladros únicamente por percusión; estos equipos no estuvieron disponibles en la sede de la EAP de Ing. de Minas, por lo que se instalaron a pulso usando combas hasta de 20 libras como puede apreciarse en la figura 75 y con una cuadrilla de personal de construcción civil, además de los estudiantes colaboradores. Para no dañar la cabeza de estos pernos, se diseñó y construyó un adaptador en un taller metal mecánico, como se detalló anteriormente. Lo más dificultoso fue la instalación de los Split Sets de 3 y 4 pies, primero por la longitud (que se duplicaba al inicio de su instalación) que imposibilitaba usar desde el inicio la mesa para instalar los pernos, segundo por ofrecer mayor resistencia a la penetración y tercero, la capacidad física de un trabajador no es lo mismo que la potencia de una máquina.



*Figura 75. Instalación de los Split Sets*

Fuente: Elaboración propia.

Las barras helicoidales, en una operación se instalan siguiendo un procedimiento, primero se introducen los materiales de acoplamiento dentro de los taladros (cartuchos de cementicio previamente remojados o resina o lechada de cemento); luego se introducen las barras dentro de los morteros con el apoyo de una perforadora rotopercutiva (jackleg o jumbos), la percusión permite a las barras helicoidales penetrarse en los morteros, mientras que la rotación hace el batido del mortero para que la mezcla se homogenice (en caso de la resina, se mezcle la resina con el catalizador para su fraguado) y se acople en las paredes del taladro y la misma barra. Para la instalación en el laboratorio, se alquilaron los rotomartillos más potentes que puedo encontrarse en el mercado, BOSCH GBH 5-40 DCE y GBH11 DE, detallados arriba. Por el fraguado violento de la resina, que excedía la capacidad de los rotomartillos, sólo pudo instalarse hasta los 3 pies de longitud efectiva de anclaje, suspendiendo los ensayos con 4 pies de LEA. La figura 76, corresponde a la instalación de las barras helicoidales con cartuchos de resina, con la colaboración de personal de construcción civil y alumnos de la EP de Ing. de Minas de la UNMSM.



*Figura 76. Instalación de las Barras Helicoidales*  
 Fuente: Elaboración propia.

iv) *Pruebas de arranque.* Las pruebas de arranque, detallado en el Anexo A, se llevaron a cabo primero en la Unidad Minera Reliquias de la Cía. Minera Castrovirreyna (Huancavelica), donde se estudiaron los pernos Swellex, Hydrabolt, Split Set y las barras helicoidales con cartuchos de cementicio y resina. La figura 77 (a), muestra la prueba de arranque del perno inflable Swellex. En el laboratorio se ensayaron los siguientes pernos: Split Set, Hydrabolt, X-Pandabolt (Swellex), Barras Helicoidales instaladas con tres tipos de

morteros (cartucho de cementicio, cartucho de resina y lechada de cemento). en el laboratorio acondicionado en la sede de la EP de Ingeniería de Minas de la UNMSM que ilustra la figura 77 (b), se usaron los equipos de arranque de la Cía. New Concept Mining (capacidad, 20 ton) y Minova (hasta 30 ton de capacidad), como se ha detallado anteriormente. Con estas pruebas se determinaron la capacidad de anclaje de los pernos y su elongación a medida que se aplican las cargas crecientes, parámetro que fue calibrado con el vernier digital Truper.



(a)



(b)

Figura 77. Pruebas de arranque (pull test). (a) En la Mina reliquias de Castrovirreyna. (b) En el laboratorio acondicionado en la sede de la EP de Ingeniería de Minas - UNMSM

Fuente: Elaboración propia.

v) *Estudio del acoplamiento de los pernos en las paredes interiores de los tubos simuladores.* El objetivo de este estudio, fue observar si los pernos instalados se acoplan completamente en las paredes de los taladros, lo cual en la práctica es casi imposible de realizar, gracias a esta metodología de utilizar los tubos simuladores (que sustituyen a los taladros), ha sido posible realizar este análisis. Para proceder con este estudio, primero se seleccionaron muestras de pernos instalados en diferentes diámetros y longitudes efectivas de anclaje, luego se seccionaron en longitudes de entre 20 y 30 cm, como ilustran las figuras 78 (a) y 78 (b), utilizando la sierra de corte rápido DEWALT D28700 (tronzadora) y sierra eléctrica en el taller metal mecánico. La figura 78 (a), muestra como ejemplo el acoplamiento de los Split Sets instalados en tubos simuladores de 37, 38 y 39 mm de diámetro y la Figura 78 (b) ilustra como ejemplo el acoplamiento de los pernos inflables Hydrabolt y X-Pandabolt instalados en diferentes tamaños de tubos simuladores (ver Anexo C). Cabe destacar que, los cortes fueron pulidos con lijas de diferentes asperezas, para eliminar las rebabas e irregularidades de los cortes. Seguidamente, usando navajas y lengüetas de acero se iban delatando las imperfecciones del acoplamiento de los distintos pernos.



vi) *Estudio del acoplamiento del mortero, centrado de las barras helicoidales y propiedades de los morteros.* Con este propósito, se prepararon probetas de las barras helicoidales instaladas en distintos diámetros de tubos simuladores como puede apreciarse en la figura 79 (a), que corresponde a las barras helicoidales instalados con diferentes materiales de acoplamiento con la finalidad de analizar la rugosidad y dureza, todos estos estudios se realizaron en el laboratorio la EAP de Ing. Industrial; mientras que el análisis del centrado de la barra helicoidal respecto al eje del tubo simulador, dureza (según escala de Mohs) y la porosidad, se llevaron a cabo sobre las muestras seccionadas y pulidas para cada diámetro ensayado en el laboratorio acondicionado en la sede de la EP Ing. de Minas. La capacidad de absorción de agua por los morteros fraguados, densidad de los morteros y humedecimiento de los cartuchos de cementicio (nuevo) en función del tiempo, se llevaron a cabo en los laboratorios de pirometalurgia y biometalurgia de la EP de Ing. Metalúrgica de la UNMSM. Al igual que para la capacidad de absorción de agua, para el tratamiento térmico, se liberaron muestras de morteros de entre el tubo simulador y la barra helicoidal, estos ensayos se llevaron a cabo en el horno eléctrico del laboratorio de Ing. Industrial. Las figuras 79 (b), 80 (a) y 80 (b), corresponden a las probetas de barras helicoidales instalados con cartuchos de resina, cartuchos de cementicio y lechada de cemento, respectivamente. El detalle de estos resultados se presenta en el Anexo E.



(a)



(b)

Figura 78. Acoplamiento de Pernos Dentro de los Tubos Simuladores. (a) Acoplamiento de los Split Sets. (b) Acoplamiento de los Pernos Inflables Hydrabolt y Swellex (X-Pandabolt)  
Fuente: Elaboración propia.

vii) *Compilación y procesamiento de datos.* Los datos registrados durante todos los procesos de ensayos, de compilaron y procesaron en programas de cómputo diseñados para cada tipo de ensayo realizado en los diferentes laboratorios con la finalidad de obtener los correspondientes resultados.

A partir de las pruebas de arranque, como se ha indicado arriba, se obtuvieron las capacidades de anclaje de los distintos tipos de pernos en estudio, primero en función de la longitud efectiva de anclaje, luego en función del diámetro del tubo simulador. Asimismo, la elongación para cada combinación de perno, diámetro y LEA se determinaron en función de la carga incremental aplicado durante las pruebas de arranque.



(a)



(b)

Figura 79. Muestras Seccionadas de Barras Helicoidales. (a) Probetas de Barras Helicoidales Instaladas con Distintos Morteros. (b) Probetas de Barras Helicoidales Instaladas con Cartuchos de Resina.

Fuente: Elaboración propia.



(a)



(b)

Figura 80. Probetas de Barras Helicoidales. (a) Instaladas con Cartuchos de Cementicio. (b) Instaladas con Lechada de Cemento

Fuente: Elaboración propia.

El acoplamiento de los pernos en las paredes de los tubos simuladores, las propiedades de los morteros de las barras helicoidales, el centrado de las barras helicoidales dentro de los tubos y otros aspectos, se obtuvieron compilando y procesando la información obtenida en los laboratorios.

viii) *Análisis y discusión de los resultados.* El análisis inicial, se llevó a cabo para cada perno individualmente de todos los aspectos estudiados como capacidad de anclaje, elongación y el acoplamiento de los pernos en la pared de los tubos simuladores. En base a ello, se ha hecho la discusión por tipo de pernos, en caso de los pernos inflables y barras helicoidales. Finalmente, se hace una discusión global entre todos los pernos estudiados, para finalmente hacer las conclusiones del estudio.

### 3.4 Unidades de Análisis

Las unidades de análisis del presente estudio, son:

- *La capacidad de anclaje de los pernos de roca.* Es una cualidad de los pernos de roca, de soportar una carga de roca cuando son instalados en la roca remanente de una excavación. Depende de una serie de factores, como tipo de roca, tipo de perno, diámetro de taladro, longitud efectiva de anclaje, condiciones de instalación, entre otros. Se determina mediante las pruebas de arranque (pull test) y su valor se obtiene de la lectura en el manómetro.
- *Elongación.* Es una propiedad de los pernos de roca que se manifiestan durante las pruebas de arranque, hasta que el perno cede, es decir, esta propiedad es importante, puesto que permiten disipar las tensiones provocadas por la sobre carga. Se mide mediante un vernier posicionado en el vástago del cilindro hidráulico del equipo de arranque y se suspende cuando en el manómetro que indica la carga deja de ascender, mejor dicho, cuando concluye la prueba de arranque.
- *Contactos y aberturas en los pernos inflables y Split Set.* Los pernos inflables y los Split Sets al ser instalados dentro de los taladros no se acoplan plenamente en las paredes de los taladros, reduciendo su capacidad de anclaje, puesto que el porcentaje de contacto depende del diámetro del taladro o tubo simulador.
- *Acoplamiento y adherencia de los morteros de las barras helicoidales.* El acoplamiento y adherencia de los morteros tanto en la barra helicoidal y la pared del taladro o tubo simulador es esencial, puesto que influirá en forma determinante en su capacidad de anclaje. Están afectadas por una serie de factores como: Tipo de mortero, el envoltorio plástico de los morteros encartuchados, presencia de óxido en las barras helicoidales, presencia de óxidos en la pared interior de los tubos, tiempo de batido del mortero y porosidad del mortero.

- *Propiedades de los morteros.* Las diferentes propiedades de los morteros como: densidad, rugosidad, porosidad, dureza, absorción de agua, tratamiento térmico, acoplamiento y adherencia, fueron analizados en diferentes laboratorios, dentro de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

- *Análisis de los efectos ambientales.* Por la reducción del número de pernos como resultado de la optimización del diámetro de taladros. Entre otros, la reducción de las emisiones de aceites, dióxido de carbono, calor y la reducción del consumo de agua y aire.

### 3.5 Población de Estudio

La población de estudio, son los distintos tipos de pernos de roca (Swellex, Hydrabolt, Expanbolt, Barras Helicoidales, Split Sets, Python, etc.). De los cuales, el Hydrabolt trabaja con retención de agua a presión en su interior, mientras que los demás pernos inflables descargan la presión del agua automáticamente luego de alcanzar los 25 – 30 Mpa de presión hasta alcanzar la presión atmosférica. Las Barras Helicoidales se instalan con material cementante o acoplamiento, los Split Sets son pernos de constricción (fricción) que se instalan por percusión en los taladros.

### 3.6 Tamaño de Muestra

El tamaño de muestra se determinó en función del tipo de perno, los diámetros de los tubos simuladores utilizados para establecer la correspondencia con la capacidad de anclaje de los pernos, se determinó que serían 4 diámetros por cada tipo perno, salvo en el caso de los Split Sets solamente se pudo ensayar en 3 tamaños de diámetro (el rango de diámetros compatibles es muy ajustado). Asimismo, las longitudes efectivas de anclaje (LEA) establecidas fueron de 1, 2, 3 y 4 pies y por cada combinación de diámetro y LEA, el número de muestras a ensayar fue de 3 ó 4 unidades, también el número de muestras estuvo en función de la disponibilidad de la cantidad de pernos, que fueron conseguidos en calidad de donación después de una larga gestión y espera, toda vez que, es imposible adquirir de los proveedores o fabricantes en pequeñas cantidades.

New Concept Mining, fue la Cía. que donó los pernos inflables Hydrabolt y X-Pandabolt y en cantidades que permitió realizar 4 ensayos por cada combinación es decir 64 ensayos por perno, que entre ambos pernos totalizaron 128 pruebas. Adicionalmente, anterior a las pruebas de laboratorio se hicieron pruebas en la mina Castrovirreyna, para cuyo estudio donó 16 pernos Hydrabolt

La Cía. Minera Poderosa S.A. donó los pernos Split Sets y Barras Helicoidales, que optimizando los cortes para las LEAs de antes indicadas, se pudo realizar 3 ensayos por cada combinación, en caso de las barras helicoidales se usaron 3 tipos de cementantes, realizándose 48 pruebas por cada tipo de cementante, es decir entre las combinaciones de la barra helicoidal con cartuchos de cementicio y lechada de cemento se realizaron 96 ensayos, mientras que para el caso de las barras helicoidales con cartuchos de resina se hicieron 36 pruebas, por la imposibilidad de instalarlas con 4 pies de LEA. En caso de los Split Sets se realizaron 36 pruebas, por consiguiente, entre las barras helicoidales y los Split Sets se realizaron 168 pruebas.

En la mina Castrovirreyna, se ensayaron los siguientes pernos: Swellex (similar al X-Pandabolt), donados por Atlas Copco, Hydrabolt (donado por NCM), Split Sets (donados por Prodac) y barras helicoidales donadas por Aceros Arequipa que fueron instaladas con cartuchos de cementicio y resina donados por Castem. Todos los pernos fueron instalados en taladros perforados con diámetros recomendados por los fabricantes o proveedores como diámetros óptimos (diámetros únicos por perno). Asimismo, las longitudes efectivas de anclaje ensayadas fueron de 1, 2, 3 y 4 pies. En el estudio realizado en la mina Castrovirreyna, se ensayaron 64 pernos en total.

En resumen, en el laboratorio se llevaron 296 ensayos y 64 en la mina Castrovirreyna, siendo entonces 360 pruebas en total. Adicionalmente, se hicieron 36 pruebas en el Laboratorio de Materiales de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP), para determinar las propiedades mecánicas de los pernos inflables, con lo cual totaliza 396 muestras estudiadas.

Cabe destacar que, para cada combinación de perno, diámetro y LEA, se realizaron entre 6 a 12 pulsaciones y registros de carga y elongación, para poder establecer la elongación de los pernos Vs carga aplicada. Es decir, únicamente con las cargas pico (capacidad de anclaje del perno), es imposible establecer el comportamiento de esta propiedad. Tal es así que, en promedio se registraron 408 datos para los Split Sets, 926 para los Hydrabolt, 980 para los Swellex, 822 para las BHCR, 622 para las BHCR y 764 para las BHLC, totalizando 4522 registros de laboratorio.

### **3.7 Selección de Muestra**

Las muestras de pernos se seleccionaron en base a una serie de consideraciones, primando la frecuencia de aplicación en las excavaciones mineras y construcción civil,

siendo estos pernos: Barras Helicoidales, Split Sets, Hydrabolts y Swellex (X-Pandabolt) (Swellex). Asimismo, la facilidad para conseguirlos en la industria minera, proveedores o fabricantes, tanto los propios pernos como los materiales complementarios. Adicionalmente, se tuvo en cuenta ensayos realizados en la Mina Reliquias de la Cía. Minera Castrovirreyna, donde se estudiaron los mismos tipos de pernos con la diferencia que para el caso de las barras helicoidales se usaron únicamente cartuchos de cementicio y resina como materiales de acoplamiento y los pernos inflables utilizados en los ensayos llevados a cabo en el laboratorio de Materiales de la Pontificia Universidad Católica del Perú, para determinar sus propiedades mecánicas.

### **3.8 Técnicas de Recolección de Datos**

Dado que el presente estudio es netamente experimental, la recolección de datos se hizo a partir de los distintos tipos de ensayos realizados sobre los pernos en estudio, sobre formatos diseñados expresamente para cada ensayo. En los ensayos de arranque tanto en el laboratorio como en el campo, un equipo de colaboradores registraba los datos que iban proporcionando, por un lado, el operador de la bomba del equipo de arranque, quien daba la lectura de la carga cada 1 o 2 ton, mientras que otro colaborador daba la lectura correspondiente a la elongación en el vernier digital. De esa forma, se registraban los dos parámetros hasta alcanzar una carga pico, luego de varios estadios o pulsaciones como se ha indicado en el acápite anterior. La carga pico representa la capacidad de anclaje de los pernos y la elongación en función de la carga aplicada.

Los datos correspondientes a la mayoría de las propiedades estudiadas, fueron reportados por el laboratorio de la Facultad de Ing. Industrial, a partir de la lectura directa de los instrumentos utilizados para cada caso. Los datos correspondientes a la densidad, capacidad de absorción de agua por los morteros de las barras helicoidales, se obtuvieron en base a los pesajes realizados en el laboratorio de la EAP de Ing. Metalúrgica. Otros datos como: contactos y aberturas en los pernos inflables y Split sets, propiedades macroscópicas de los morteros de las barras helicoidales como: Posición de la barra respecto al eje del tubo simulador, porosidad, acoplamiento, aspereza al tacto, presencia del envoltorio plástico, dureza en la escala de Mohs, fueron registrados en el laboratorio acondicionado en la sede de la EP de Ing. de Minas.

### 3.9 Áreas de Pruebas, Laboratorios y Talleres

**3.9.1 Sede de la EP de Ingeniería de Minas.** En la sede de la EP de Ing. de Minas, dentro del Campus de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, se acondicionó un laboratorio para la preparación e instalación de los pernos Split Sets y Barras Helicoidales. La figura 81 (a), corresponde a la recepción de los pernos inflables preparados en la planta de la Cía. New Concept Mining, listos para hacer las pruebas de arranque y la figura 81 (b) ilustra la construcción del pozo para posicionar los pernos durante las pruebas de arranque, que fue coronado con una losa de concreto para facilitar el ensayo de pernos que excedían la altura de la mesa de ensayos. Cabe destacar que, todas las pruebas de arranque (pull test) de laboratorio, se llevaron a cabo en el laboratorio de esta sede, salvo las pruebas llevadas a cabo en la mina Castrovirreyna (terreno real). Asimismo, se prepararon probetas de los diferentes pernos para hacer el análisis de su acoplamiento en las paredes de los tubos simuladores, así como el efecto de los envoltorios plásticos de los morteros utilizados con las barras helicoidales y algunas propiedades de éstos, como la porosidad y dureza según la escala de Mohs. En caso de los pernos inflables y de constricción (Split Set), en esta sede se analizaron aberturas y contactos que se configuran al instalarlos.



(a)



(b)

*Figura 81. Sede de la EP Ingeniería de Minas. (a) Presentación de Pernos Inflables Antes del Inicio de las Pruebas. (b) Construcción del Pozo de Ensayos Coronado con una Losa de Concreto.*

Fuente: Elaboración propia.

**3.9.2 Planta de la Cía. New Concept Mining.** En la planta de la Cía. New Concept Mining, se prepararon y se instalaron los pernos inflables Hydrabolt, X-Pandabolt, que básicamente consistió en el entubado (tubos simuladores y de estrangulamiento) e inflado. La figura 82 (a) corresponde a la preparación de dichos pernos, posicionando adecuadamente los tubos simuladores y de estrangulamiento durante su instalación (inflado). La figura 82



(b), ilustra el proceso de instalación de los pernos inflables, utilizando para ello una bomba hidroneumática de alta presión (25 MPa), conectado a una fuente de agua y a un compresor.

**3.9.3 Crucero 752 de la Mina Reliquias – Castrovirreyna.** Esta mina se encuentra en el Distrito de Santa Ana de la Provincia de Castrovirreyna del Dpto. de Huancavelica. En esta mina, se hicieron las pruebas de arranque en el Crucero 752 en zona de estériles, mucho antes de idear y realizar las pruebas en laboratorio; se estudiaron los pernos Swellex, Split Sets, Hydrabolt y las barras helicoidales instaladas con cartuchos de resina y cementicio. La figura 83 (a), muestra la portada del nivel 645 por donde se accede al crucero 752. Asimismo, la figura 83 (b) corresponde a la instalación de los pernos Hydrabolt en el hastial del crucero 752. Cabe destacar que, en esta prueba únicamente se pudo desarrollar las pruebas de arranque, que proporciona la capacidad de anclaje del perno y su elongación; otros estudios como el acoplamiento de pernos, propiedades de los morteros, tratamiento térmico fueron imposibles de analizar, por cuanto en un terreno real no es factible disponer de probetas de pernos para realizar otros estudios.



(a)



(b)

Figura 82. Planta de la Cía. New Concept Mining. (a) Preparación de los Pernos Inflables Hydrabolt y X-Pandabolt. (b) Proceso de Instalación de Dichos Pernos.

Fuente: Elaboración propia.

**3.9.4 Taller metal mecánica MUJIPRO.** En taller metal mecánico MUJIPRO, se desarrollaron una serie de trabajos antes y después de las pruebas de arranque, como:



- Construcción de la mesa para determinar la capacidad de anclaje de los pernos de roca enbase al diseño mostrado en la figura 50 (a). Las figuras 50 (b) y 84 (b), ilustran la mesa ya construida.
- Construcción de arandelas de tope y para las mordazas utilizadas durante las pruebas de arranque, precisamente en la parte central de la figura 84 (a) se observa el inicio de la construcción de las arandelas, con el proceso de corte de una plancha de fierro de 10 mm de espesor con una sierra eléctrica, para su posterior maquinado en un torno electrónico.
- Preparación de los tubos simuladores y de estrangulamiento, como puede apreciarse en la figura 84 (a), los tubos vienen en longitudes de 6 y 6,40 m de longitud los que fueron cortados acorde con las longitudes efectivas de anclaje establecidas.



(a)



(b)

Figura 83. Mina Reliquias de la Cía. Minera Castrovirreyna. (a) Portada del Nivel 642. (b) Crucero 752 del Nivel 642

Fuente: Elaboración propia.

- Trabajos de soldadura, se realizaron diversos trabajos de soldadura como el soldado de las arandelas de tope en uno de los extremos de los tubos simuladores como ilustra la figura 71, fijación de las arandelas en las cabezas de los pernos inflables para facilitar las pruebas de arranque (ver figura 84 (b), entre otros.
- Construcción de los adaptadores para la instalación de los pernos y pruebas de arranque ilustrados en las figuras 64, 65 y 66.
- Preparación de probetas para el análisis de acoplamientos, contactos y aberturas de los pernos instalados. Asimismo, el fresado para liberar los morteros de las barras helicoidales.



Figura 84. Taller Metal Mecánico MUJIPRO. (a) Preparación de Tubos Simuladores y de Estrangulamiento y, Arandelas. (b) Mesa para Determinar la Capacidad de Anclaje de los Pernos de roca y Pernos Inflables con sus Arandelas de Tope Soldadas.

Fuente: Elaboración propia.

**3.9.5 Laboratorio de Máquinas y Herramientas de la Facultad de Ingeniería Industrial – UNMSM.** En este laboratorio, se hicieron los ensayos sobre las probetas de los morteros de las barras helicoidales preparadas en MUJIPRO. Se analizaron y determinaron la rugosidad, dureza relativa, tratamiento térmico y Charpy. La figura 85 (a), ilustra al Dr. José López, encargado del laboratorio, coordinando con sus asistentes para el correcto manejo de los equipos y la metodología a seguir en cada prueba; mientras que la figura 85 (b), ilustra a los asistentes preparando las probetas para las pruebas antes indicadas.

**3.9.6 Laboratorios de la EP de Ingeniería Metalúrgica – UNMSM.** En los laboratorios de pirometalurgia y biometalurgia de la EP de Ing. Metalúrgica, se determinaron las densidades de los morteros tal como ilustra la figura 86 (a), donde el Mg. Vladimir Arias Jefe del Laboratorio de biometalurgia realiza los pesajes en la balanza analítica Z Ohaus TJ 261. La figura 86 (b), ilustra las probetas sumergidos en agua para determinar la absorción de agua por los morteros de las barras helicoidales, este ensayo se realizó en el laboratorio de pirometalurgia, utilizando la balanza analítica Z Ohau AR 3130. El humedecimiento de los cartuchos de cementicio en función del tiempo de remojo, se determinó en el laboratorio de Biometalurgia.



(a)

(b)

*Figura 85. Laboratorio de Máquinas y Herramientas de la Facultad de Ingeniería Industrial. (a) Dr. José López coordinando con sus asistentes para la ejecución las pruebas. (b) Preparación de las probetas para los ensayos.*

Fuente: Elaboración propia.



(a)

(b)

*Figura 86. Laboratorios de la EP de Ingeniería Metalúrgica - UNMSM. (a) Determinación de la densidad en el laboratorio de Bio metalurgia. (b) Ensayo de absorción de agua en el laboratorio de piro metalurgia.*

Fuente: Elaboración propia.

### 3.10 Compilación y Procesamiento de Datos

Previo a la realización de las pruebas de distintas naturalezas, durante el estudio, se diseñaron formatos para registrar los datos en forma sistemática y funcional, agrupados por diámetro y en cada caso 4 longitudes efectivas de anclaje como se ilustran en el anexo A. Asimismo, se diseñaron programas de cómputo en Excel para compilar y procesar los datos tomados en los ensayos. Asimismo, los datos también se procesaron en el programa estadístico SPSS22.

Para las pruebas de arranque, se usaron los equipos de New Concept Mining de 20 ton y calibrada por la Universidad Nacional de Ingeniería y, el equipo de Minova de 30 ton calibrada por la Universidad de Santiago de Chile (USACH), cuyas certificaciones se presentan en el anexo B. Gracias a estas calibraciones, se establecieron las ecuaciones de ajuste de las cargas registradas en las lecturas de los manómetros de los equipos de arranque. Cabe destacar que, las cargas se registraron en varios pulsos en incrementos de 1 o 2 ton de acuerdo a la capacidad de anclaje previsto para cada tipo de perno. A medida que se iban compilando los datos, el programa automáticamente arrojaba las cargas ajustadas según las ecuaciones de ajuste, asimismo arrojaba los promedios de las cargas por diámetro y longitud efectiva de anclaje. Como se ha indicado arriba, durante las pruebas de arranque también se registraban las elongaciones de los pernos, justamente para analizar su variación, las lecturas de las cargas se registraron en varios pulsos, en este caso también el programa diseñado arrojaba las elongaciones por cada prueba y los promedios correspondientes por diámetro y LEA.

Análogamente, los datos registrados referentes al acoplamiento, contactos y aberturas en caso de los pernos inflables y Split Set, se compilaron y procesaron en hoja de cálculo, determinándose los contactos porcentuales. Mientras que para las barras helicoidales, se determinaron las propiedades de los morteros, centrado de las barras respecto al eje de los tubos simuladores, entre otros.

### **3.11 Discusión de Resultados**

La discusión de resultados obtenidos de las pruebas en laboratorio, se ha realizado siguiendo una secuencia. Primero se discute los resultados concernientes a cada perno, luego por familia de pernos (pernos inflables, helicoidales y Split Set) y finalmente para todos los pernos estudiados. Asimismo, se hace una discusión de los resultados obtenidos en la mina Castrovirreyna con los obtenidos en el laboratorio, para los diámetros comunes utilizados.

En todos los casos, se discute: a) Capacidad de anclaje en función de la longitud efectiva de anclaje para los diferentes diámetros de tubos simuladores. b) Capacidad de anclaje en función del diámetro de los tubos simuladores para cada longitud efectiva de anclaje. c) Elongación de los pernos en función de la carga aplicada para las diferentes longitudes efectivas de anclaje y diámetros de tubos simuladores. d) En caso de los pernos Hydrabolt, X-Pandabolt y Split Sets, se hace una discusión de las aberturas y contactos que se generan en función del diámetro del tubo simulador. e) En caso de las barras helicoidales,

se discute la posición de la barra respecto al eje del tubo simulador y las propiedades del mortero como: porosidad, acoplamiento y adherencia, presencia de envoltorios, aspereza / rugosidad, dureza, densidad, absorción de agua (hidratación), tratamiento térmico. f) Para los diámetros comunes, se hace una discusión de los resultados obtenidos en la mina Castrovirreyna con los obtenidos en el laboratorio, para apreciar la diferencia que existe entre ambos resultados. Con estas discusiones se formulan las conclusiones de la tesis.

### **3.12 Recursos Humanos**

El presente estudio, se llevó a cabo en una serie de etapas, desde la formulación del proyecto hasta su culminación, como: a) Gestiones para contar con los pernos de roca en la variedad y cantidad necesaria. b) Recepción y traslado de los pernos y materiales requeridos a los talleres, plantas y a la sede de la Escuela de Ing. de Minas. c) Adquisición y traslado de tubos simuladores al taller metal mecánico, a la planta de NCM y a la sede de la Escuela de Minas. d) Traslado de equipos en alquiler y propios. e) Preparación y acondicionamiento de los pernos de roca. f) Proceso de instalación de los pernos, manipuleo y almacenamiento. g) Ejecución de las pruebas de arranque, manejo de equipos de arranque, registro de datos y almacenamiento de los pernos ensayados. h) En caso de las barras helicoidales, traslado de muestras al taller para su seccionamiento para el análisis de las propiedades de los morteros. i) Seccionamiento de pernos inflables y Split Sets en la sede de la Escuela de Ing. Minas para analizar contactos y aberturas. j) Otros. Todas las actividades realizadas, estuvo liderado por el autor y para la ejecución de la mayoría ellas, se contó con el apoyo de 20 alumnos de la Escuela de Ing. de Minas de la UNMSM, de los cuales 6 participaron en forma permanente. Asimismo, por la dificultad en la instalación de los Split Sets y barras helicoidales con cartuchos de resina, se contrató 8 obreros de construcción civil; 3 metal mecánicos, 2 Técnicos de NCM y 1 trabajador de apoyo.

## **Capítulo 4**

### **Resultados del Estudio de los Split Sets**

Los Split sets, son pernos de constricción, contruidos a partir de un fleje de acero, con un espesor de 2,3 o 3 mm, siendo el acero ASTM A1011 grado 60 de alta resistencia y con diámetros de 33, 39 o 46 mm. Tiene una ranura de 15 mm de ancho en toda su longitud, para posibilitar su acoplamiento en la pared de los taladros previamente perforados para su instalación. Al irse introduciendo estos pernos dentro de los taladros o tubos, gracias a la percusión de la perforadora rotopercutiva, dicha ranura se va cerrando y el perno acoplándose y ajustándose contra la pared del taladro. Su cola es cónica de una longitud que varía de 8 a 15 cm para facilitar su penetración dentro de los taladros durante la instalación, en el presente caso dentro del tubo simulador. A 8 mm del extremo de su cabeza, lleva soldado un anillo de alambón de 6 u 8 mm de diámetro, tal como se ilustró en la figura 35 (Capítulo II), para facilitar su instalación y sujeción de la placa o planchuela. Se fabrican en tres modelos: Estándar, galvanizado y acero inoxidable, de acuerdo a las condiciones de agua en el terreno donde se aplican.

Los Split Sets usados en el presente estudio, fueron donados por la Cía. Minera Poderosa, cuyo proveedor es Prodac, siendo su diámetro de 39 mm y 5 pies (1,5 m) de longitud. Por esta longitud única, fue necesario cortarlos de acuerdo a las LEAs establecidas, con la cortadora de metales visto en el Capítulo III y que muestra la figura 87 (a). Tal es así que, considerando la longitud de la conicidad en la cola de 15 cm y en la cabeza 11,6 cm para instalar la mordaza del equipo de arranque durante las pruebas, se cortaron en tamaños de: 56,6; 86,6; 116,6 y 146,6 cm, para tener longitudes efectivas de anclaje de 1, 2, 3 y 4 pies, respectivamente. Una vez cortados en las longitudes antes indicadas, fue necesario volver a conificar la cola, similar a lo realizado en la fábrica, usando un yunque y comba como ilustra la figura 87 (b), para facilitar su instalación en los tubos simuladores.





(a) (b)  
 Figura 87. Preparación de Split sets. a) Proceso de Corte. b) Conificado de la cola  
 Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1 Capacidad de Anclaje en Función de la LEA

Para lograr las longitudes efectivas de anclaje (LEA) de 1, 2, 3 y 4 pies en los 3 diámetros ensayados, los tubos simuladores se cortaron en longitudes de 45, 75, 105 y 135 cm, es decir 15 cm adicionales a las LEAs por la conicidad en la cola de los Split Sets, dado que, al instalarlos dentro de los tubos simuladores, ésta quedaría al ras del extremo opuesto del tubo simulador. La figura 88, deducido de la tabla de valores presentados como modelo en el Anexo A-1, presenta las capacidades de anclaje de los Split Sets en función de las LEAs instalados en tubos simuladores de 37,3; 38,14 y 38,3 mm de diámetro. En esta Figura se observa que, para todos los diámetros, las curvas tienen pendientes bien empinadas hasta 3,0 pies de LEA, a partir de la cual, la pendiente se suaviza mostrando su tendencia a tornarse asintótica a partir de 4 pies de LEA.

Asimismo, los Split Sets muestran mayor capacidad de anclaje cuando se instala en diámetro de 37,3 mm (37 mm) y mostrando el valor más bajo para el diámetro de 38,3 mm (39 mm) (mayor diámetro). Este gráfico también permite establecer que, LEAs superiores a 4 pies son innecesarios.

#### 4.2 Capacidad de Anclaje en Función del Diámetro del Tubo Simulador

A partir de los resultados obtenidos y presentados como modelo en el Anexo A-1, la capacidad de anclaje de los Split Sets, para LEAs de 1, 2, 3 y 4 pies; alcanza su mayor valor cuando el diámetro de taladro o tubo simulador donde se instalan tiene 37,8 mm para 3 pies de LEA, mientras que, para 4 pies de LEA, alcanza su mayor valor para 37,3 mm de



diámetro, como puede apreciarse en la figura 89, de donde se concluye, que la LEA ideal es 4 pies. Desde el punto de vista técnico y económico, diámetros más pequeños de perforación son más convenientes.

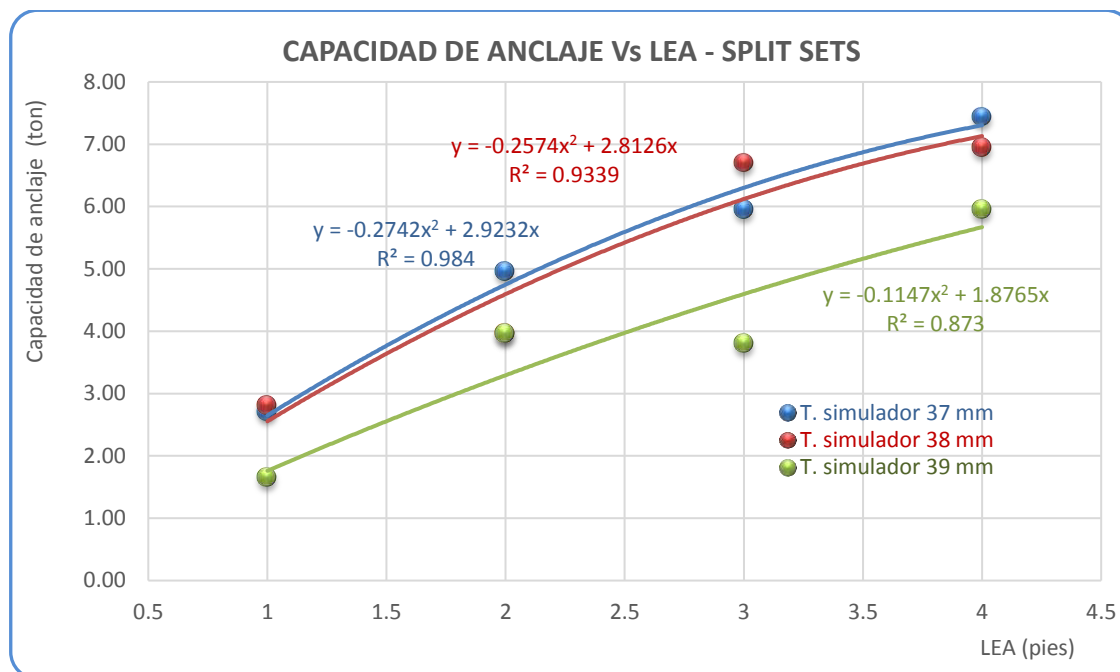


Figura 88. Capacidad de Anclaje de los Split Sets en Función de la Longitud Efectiva de Anclaje (LEA)  
Fuente: Elaboración propia.

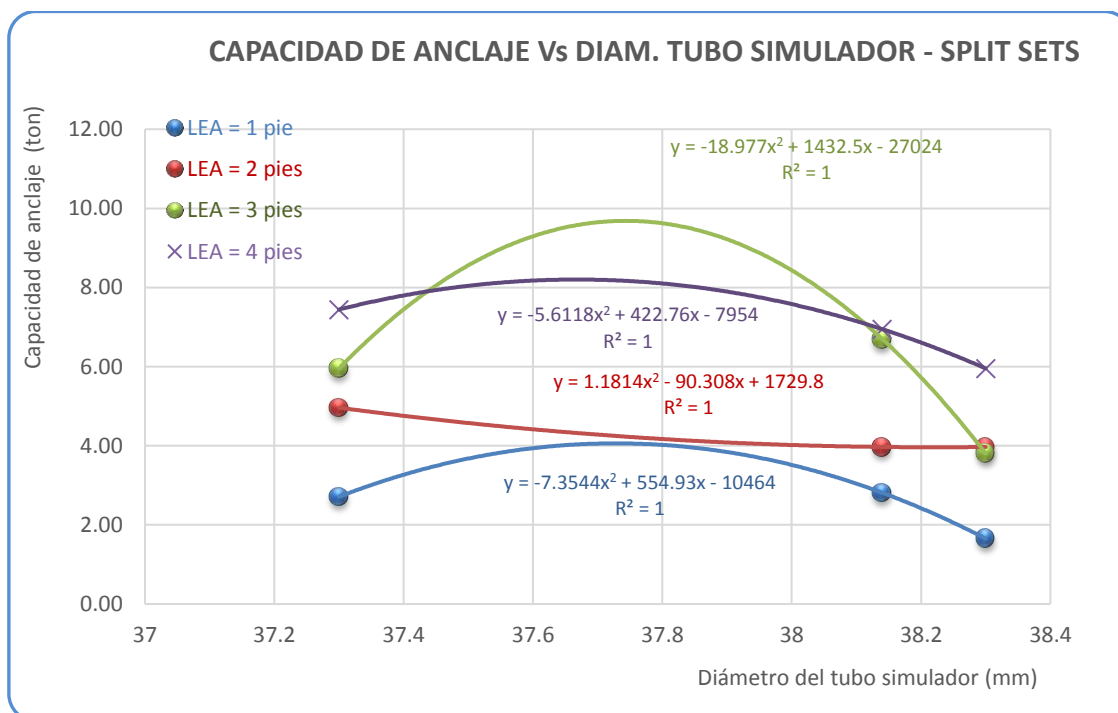


Figura 89. Capacidad de Anclaje de los Split Sets en Función del Diámetro de Tubo Simulador.  
Fuente: Elaboración propia.

### 4.3 Elongación del Perno en Función de la Carga Aplicada y Diámetro del Tubo Simulador

La tabla 11, tomado como modelo a partir de los valores expuestos como modelo en el Anexo A-1, presenta en resumen la elongación de los Split Sets para 2 pies de LEA instalados en diferentes tubos simuladores en el laboratorio, donde se puede apreciar que, para 3,97 ton de carga, se tienen las siguientes elongaciones: 1,78; 2,12 y 1,89 mm para los respectivos diámetros de 37 (37,3 mm), 38,14 (38 mm) y 38,3 (39 mm).

La elongación en función de la carga aplicada en los Split Sets instalados en los diferentes diámetros de tubos simuladores, tienen similar comportamiento, tal como ilustra la figura 90. Asimismo, se observa que todas las curvas obedecen a una ecuación lineal, aproximadamente 0,5 mm/ton de carga aplicada.

Tabla 11

*Elongación de los Split Sets Ensayados en Laboratorio con 2 pies de LEA*

Carga aplicada (ton)	Elongación para 2 pies de LEA (mm)		
	37 mm	38 mm	39 mm
0,00	0,00	0,00	0,00
0,99	0,02	0,01	0,04
1,98	0,26	0,52	0,62
2,98	1,05	1,24	1,28
3,97	1,78	2,12	1,89
4,96	2,67		

Fuente: Elaboración propia.

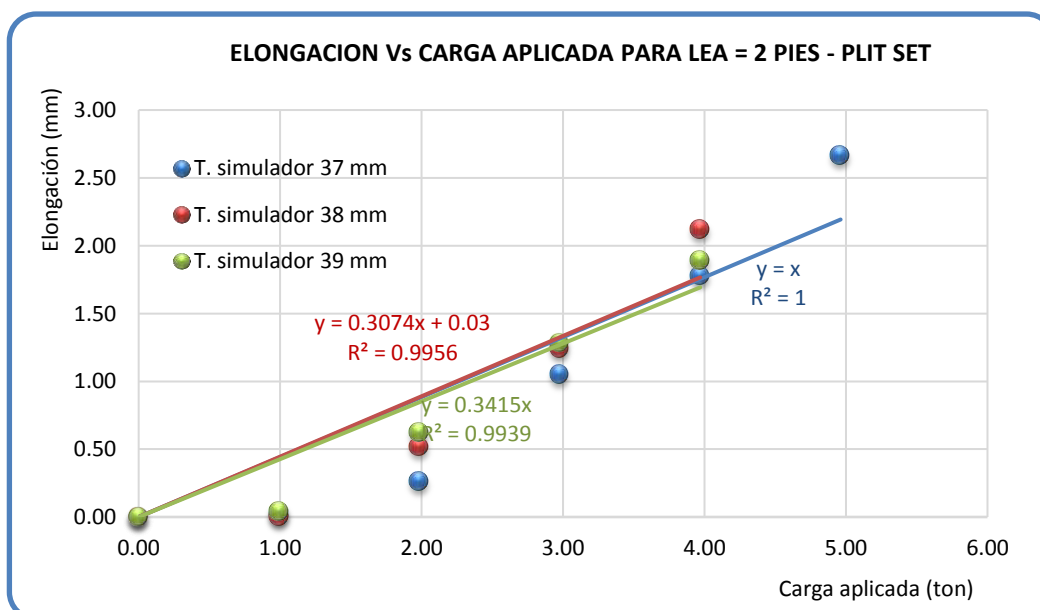


Figura 90. Elongación de los Split Sets Instalados en Diferentes Tubos Simuladores

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.4 Contactos y Aberturas en Función del Diámetro del Tubo Simulador

Los Split Sets no se acoplan perfectamente en las paredes de los tubos simuladores (taladros), como puede apreciarse en la figura 91, se generan franjas de aberturas además de la propia ranura del perno, en anchos crecientes como aumenta el diámetro del tubo simulador, así, en tubos simuladores de 37 (37,3 mm) y 38 (38,14) mm se generan 2 aberturas a cada lado de la ranura y en 39 (38,3) mm uno a cada lado del mismo, cuyo resumen y sus dimensiones se presenta en la tabla 12.



Figura 91. Contactos y Aberturas de los Split Sets en Diferentes Tubos Simuladores.  
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 12  
Aberturas en los Diferentes Diámetros de Tubos Simuladores

Diámetro del tubo simulador (mm)	Aberturas generadas en los Split Sets (mm)				Abertura debido a la ranura (mm)
	1	2	3	4	
37,3	9,53	24,91	12,06	11,30	10,18
38,14	8,97	14,42	23,96	13,70	12,99
38,3	44,09	47,45			14,60

Fuente: Elaboración propia.

Bajo esa configuración, el área de contacto respecto al diámetro del Split Set, decrece como aumenta el diámetro del tubo simulador, mientras que el área sin contacto aumenta proporcionalmente como aumenta el diámetro del tubo simulador, como puede corroborarse en la tabla 13 y figura 92, derivados de los valores presentados en el Anexo C-1. Este resultado comparativo ratifica que los Split Sets muestran mayor capacidad de anclaje para tubos simuladores de 37 (37,3 mm), dado que el área de contacto es mayor que para otros diámetros, es decir, 45,31 %. Mientras que para tubos simuladores de 39 (38,3 mm) (mayor diámetro ensayado), el área de contacto es tan solo 14,13 % y su correspondiente capacidad de anclaje es lo más bajo como se ha mostrado en el Figura N° 88.

Tabla 13

*Area (%) con o sin Contactos en los Split Sets Instalados en Tubos Simuladores*

Diámetro del tubo simulador (mm)	Area de contacto (%)	Area sin contacto (%)	Area sin contacto debido la ranura (%)
37,3	45,31	54,69	9,37
38,14	44,31	55,69	11,88
38,3	14,13	85,87	13,46

Fuente: Elaboración propia.

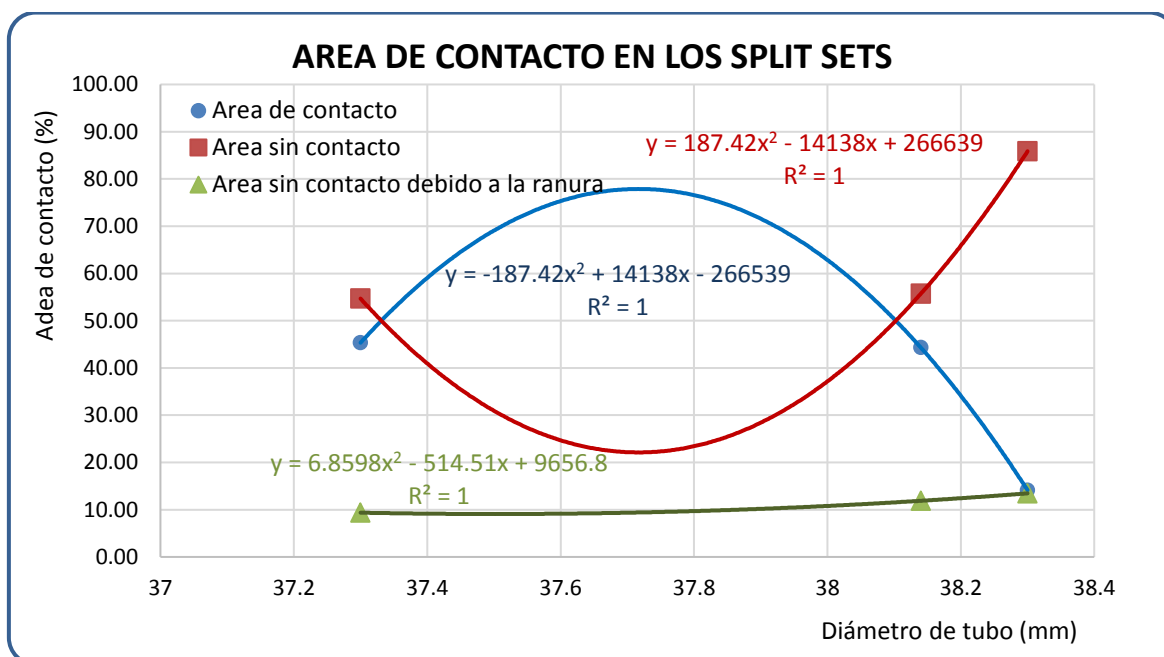
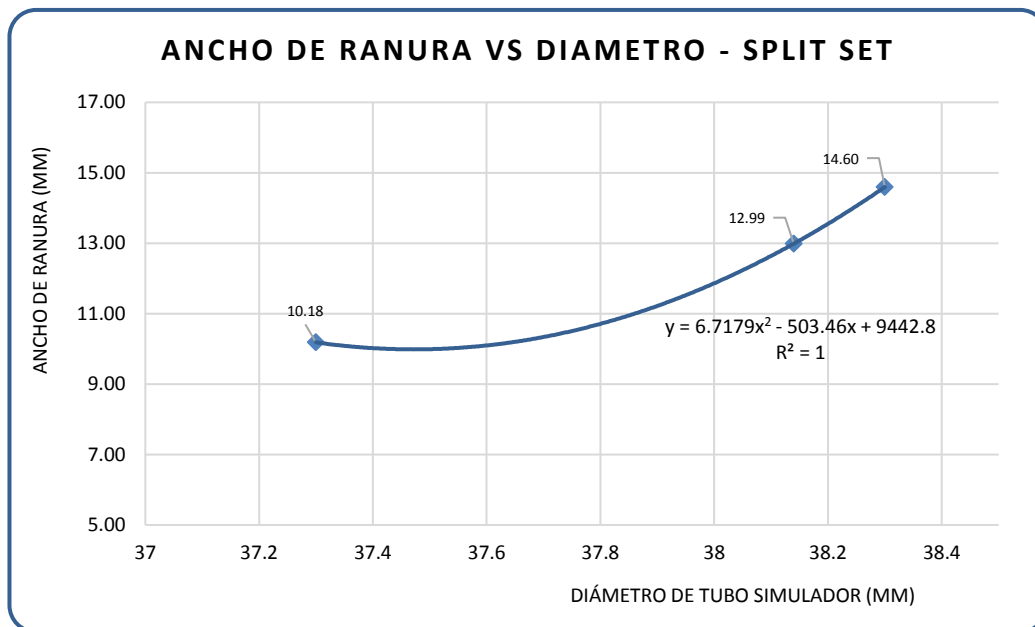


Figura 92. Áreas con o sin Contacto en los Split Sets en Función del Diámetro del Tubo Simulador

Fuente: Elaboración propia.

El ancho de la ranura de los Split Sets, se cierra en función del diámetro del tubo simulador, tal es así que, para diámetro de 37 (37,3 mm) la ranura se cierra de 15 mm a 10,18 mm, mientras que en diámetro de 39 (38,3 mm) se cierra únicamente a 14,6 mm, esta correspondencia se presenta en la figura 93.



*Figura 93. Ancho de la Ranura del Split Set en Función del Diámetro del Tubo Simulador*  
Fuente: Elaboración propia.

## Capítulo 5

### Resultados del Estudio de los Pernos Inflables Hydrabolt

Los pernos inflables Hydrabolt, cuyo ejemplo ilustra la figura 94, al igual que otros de su especie (Swellex, Python, X-Pandabolt, etc.), son fabricados a partir de un tubo de acero, que son tratados de aplanar hasta que sus paredes interiores opuestas queden muy cercanos entre ellas (aproximadamente 1,5 mm), luego del cual, es rolado hasta quedar como un sector circular de alto ángulo (aproximadamente de  $340^\circ$ ) de doble pared en forma de “C”, como puede apreciarse al lado izquierdo de la figura 96. Ese proceso se realiza para reducir el diámetro original del tubo del que es fabricado, con la finalidad que pueda introducirse en un taladro de menor diámetro que su diámetro original. Para que al inflarlo con agua a alta presión y tratar de recobrar su diámetro y forma original, la pared exterior del perno se acopla en la pared del taladro perforado previamente, haciendo anclaje.



*Figura 94. Perno Hydrabolt Completo Mostrando sus Partes*

Fuente: Elaboración propia.

El tubo enrolado se sella por ambos extremos con bujes (manguitos), como ilustran las figuras 94 y 95. Donde la figura 95 (a) muestra la cola del perno Hydrabolt, sellando al perno por ese extremo con un buje soldado, para facilitar su penetración dentro de los taladros (tubos simuladores) y soportar la presión de agua. La figura 95 (b), muestra la cabeza del perno, que consta de un buje de mayor longitud que de la cola y con pestaña (en forma de brida) para sujetar la planchuela con la que se instala; sobre éste lleva soldada la válvula anti retorno, por donde se inyecta el agua durante su inflado.

Luego de introducir el perno dentro del taladro (tubo simulador), se infla con una bomba hidroneumática de alta presión de 25 a 30 MPa de presión. El perno inflado, genera una fuerza radial perpendicular a su eje y una fuerza de rozamiento estático o fricción en

toda su longitud. Estos pernos son fáciles de instalar. Cuando el inflado ha concluido, al alcanzar la presión antes indicada, una aguja de color sella el ingreso de agua, quedando en su interior a la presión antes indicada, facilitando además su verificación de una correcta instalación (Giraldo paredez, 2013).

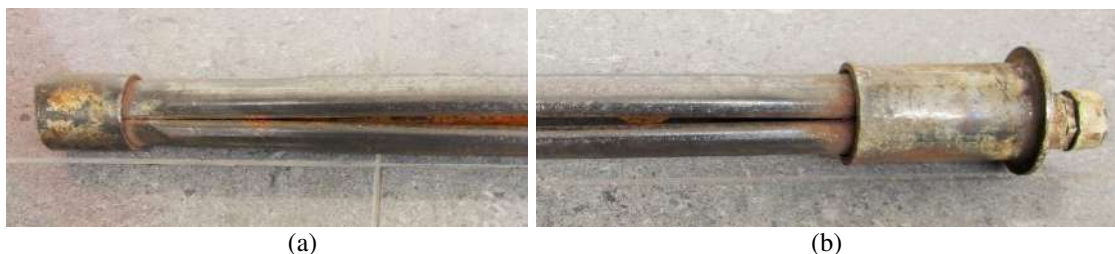


Figura 95. Extremos del Perno Hydrabolt. (a) Buje de la Cola. (b) Buje de la Cabeza  
Fuente: Elaboración propia.

Los 64 pernos de roca Hydrabolt requeridos por el estudio, fueron donados por la Cía. New Concept Mining Perú, los mismos que son del modelo HYDRABOLT  $\Phi$  29. Tiene un diámetro nominal de 29 mm y todos fueron de 6 pies de longitud (1,8 m). Para determinar el diámetro real de estos Hydrabolt, se tomaron como muestra 3 pernos Hydrabolt y se hicieron las mediciones con un vernier digital a lo alto y ancho de la sección en “C” conformada durante su fabricación, como se ha detallado arriba, cuya muestra seccionada puede apreciarse al lado izquierdo de la figura 96. Asimismo, las calibraciones se hicieron antes y después del inflado al aire libre, cuya muestra seccionada ilustra el lado derecho de la figura 96. Para ambos estados de estos pernos, se tomaron mediciones a lo largo de los pernos en las siguientes posiciones: uno a 16 cm de la cabeza, otro en el centro y un tercero a 16 cm de la cola.

La tabla 14, presenta las calibraciones practicadas a las tres muestras de Hydrabolt, antes y después de su inflado al aire libre (sin confinamiento); de donde se deduce que los diámetros promedios son: antes del inflado a lo alto de la “C” tiene 28,50 mm y a lo ancho 26,50 mm. Mientras que después del inflado a lo alto de lo que era la “C”, tiene 42,5 mm y a lo ancho 42,94 mm, promediando estos dos últimos valores, se obtiene que el tubo original antes de la fabricación del Hydrfabolt habría tenido 42,72 mm de diámetro, siendo el espesor de su pared 2 mm.





Figura 96. Hydrabolt Seccionado Antes y Después de su Inflado al Aire Libre  
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 14

Calibración del Diámetro del Perno de Roca Hydrabolt

Diámetros del hydrabolt $\phi$ 29 antes y después de su inflado al aire libre (mm)											
Antes del inflado de acuerdo del perfil en "C"						Después del inflado concordante la posición del perfil en "C" original					
A 16 cm del extremo de la cabeza		En centro del perno		A 16 cm del extremo de la cola		A 16 cm del extremo de la cabeza		En centro del perno		A 16 cm del extremo de la cola	
A lo alto	A lo ancho	A lo alto	A lo ancho	A lo alto	A lo ancho	A lo alto	A lo ancho	A lo alto	A lo ancho	A lo alto	A lo ancho
28.47	26.32	28.41	26.65	28.43	26.90	41.70	43.50	43.10	42.70	43.45	43.30
28.10	26.21	28.36	26.80	28.40	26.36	41.72	42.80	43.11	42.30	42.40	43.70
28.46	26.48	28.72	26.40	28.56	26.40	41.90	42.70	42.80	42.80	42.30	42.70
<b>28.34</b>	<b>26.34</b>	<b>28.50</b>	<b>26.62</b>	<b>28.46</b>	<b>26.55</b>	<b>41.77</b>	<b>43.00</b>	<b>43.00</b>	<b>42.60</b>	<b>42.72</b>	<b>43.23</b>

Fuente: Elaboración propia.

Comparando los diámetros antes y después del inflado de los Hydrabolt a lo alto de la sección en "C", se concluye que el diámetro original del tubo del que se fabrican estos pernos, se reduce a 67 %, lo cual posibilita introducir el Hydrabolt en diámetros de taladro mucho menores a su diámetro original, como ilustra la figura 97, donde se aprecia el Hydrabolt antes de su inflado incluido dentro de una sección completamente inflado (al aire libre) (Giraldo Paredez, Propiedades mecánicas y de sostenimiento de los pernos de roca inflables cargados y descargados, 2011).

El buje de la cabeza pestañada, soldado en uno de los extremos del perno, tiene 32 mm de diámetro y 55 mm de longitud, la pestaña (en forma de brida) tiene 2,5 mm de espesor y 44,4 mm de diámetro, cuya función es sujetar las planchuelas con las que se instalan estos pernos. Sobre la pestaña, lleva soldada la válvula anti retorno de 19,5 mm de diámetro y 19 mm de longitud, similar a lo que ilustra la figura 105 (a). El buje de la cola, tiene 26 mm de

diámetro y 25 mm de longitud que sella al perno por su cola. La separación de los extremos de la “C” o abertura es de 3,5 mm en promedio.



*Figura 97. Hydrabolt Antes de su Inflado Incluido en Otro Completamente Inflado al aire libre*  
Fuente: Elaboración propia.

La longitud muerta de los pernos Hydrabolt, es decir, la longitud que no hace anclaje, debido a los bujes en la cabeza y cola, son respectivamente: 5,5 cm y 2,5 cm; es decir 8,0 cm, a esto se debe sumar la conicidad que se forma entre los bujes y la pared de los taladros o tubo simulador durante su instalación, es así que, en la cola se genera un tronco de cono de 3 cm de alto y en la cabeza 2,0 cm, que tampoco hacen anclaje. Por consiguiente, la longitud muerta es 13,0 cm.

Cuando se inflan los pernos Hydrabolt al aire libre, alcanzan su máxima expansión, pero sin recobrar la sección circular del tubo original del que fue fabricado, como puede apreciarse el lado derecho de la figura 96 y la figura 97, la forma que adquiere se asemeja a la huella de un plantígrado. En la parte posterior de la otrora sección en “C”, se nota la forma de media elipse y hacia delante, una poligonal de 3 lados, que conformaban el plegamiento hacia el interior de dicha sección, como puede apreciarse al lado izquierdo de la figura 96. Asimismo, a lo largo del perno, se observa que se curva ligeramente hacia la espalda de lo que fue la sección en “C”, con un radio aproximado de 10 m, es decir, quedando la parte convexa de la curva hacia delante de la otrora “C”. La figura 98, muestra un conjunto de

pernos Hydrabolt inflados al aire libre, donde se puede apreciar la posición y grado de su curvamiento.



*Figura 98. Curvamiento Longitudinal de los Pernos Hydrabolt Inflados al Aire Libre.*  
Fuente: Elaboración propia.

### 5.1 Capacidad de Anclaje en Función de la LEA

La capacidad de anclaje de los pernos Hydrabolt en función de la LEA para los diferentes diámetros de tubos simuladores, se presenta en la tabla 15, obtenido de los valores detallados en el Anexo A-2 (presentado como modelo) y cuya correspondencia se ilustra en la figura 99. En esta figura se aprecia que para diámetros de 36 (36,3); 38 (38,3) y 40 (40,96) mm su capacidad de anclaje crece hasta 3 pies de LEA, a partir de la cual, se torna asintótica. Para diámetro de 33 (32,5 mm), el Hydrabolt muestra una capacidad de anclaje más baja que para los diámetros anteriores, pero con tendencia a seguir creciendo hasta más allá de 4 pies de LEA. Se observa que el diámetro más apropiado para instalar los Hydrabolt estudiados, es 38 (38,3 mm), dado que muestra mayor capacidad de anclaje para todas las LEAs; en segundo orden está el diámetro de 40 (40,96 mm). Otro aspecto que demuestran estos resultados es que, utilizar LEAs superiores a 3 pies, es innecesario.

Adicionalmente, la capacidad de anclaje de los Hydrabolt no guarda una relación lineal con la longitud efectiva de anclaje, sino cuadrática, tal como puede apreciarse en las ecuaciones correspondientes a cada curva en la figura 99.

*Tabla 15*

*Capacidad de Anclaje de los Pernos Hydrabolt en Función de la Longitud Efectiva de Anclaje*

LEA (pies)	Capacidad de anclaje (ton)			
	33 mm	36 mm	38 mm	40 mm
1	9.52	9.52	9.52	11.42
2	9.52	13.32	15.23	13.32
3	11.42	13.32	15.23	15.23
4	13.32	15.23	15.23	15.23

Fuente: Elaboración propia.

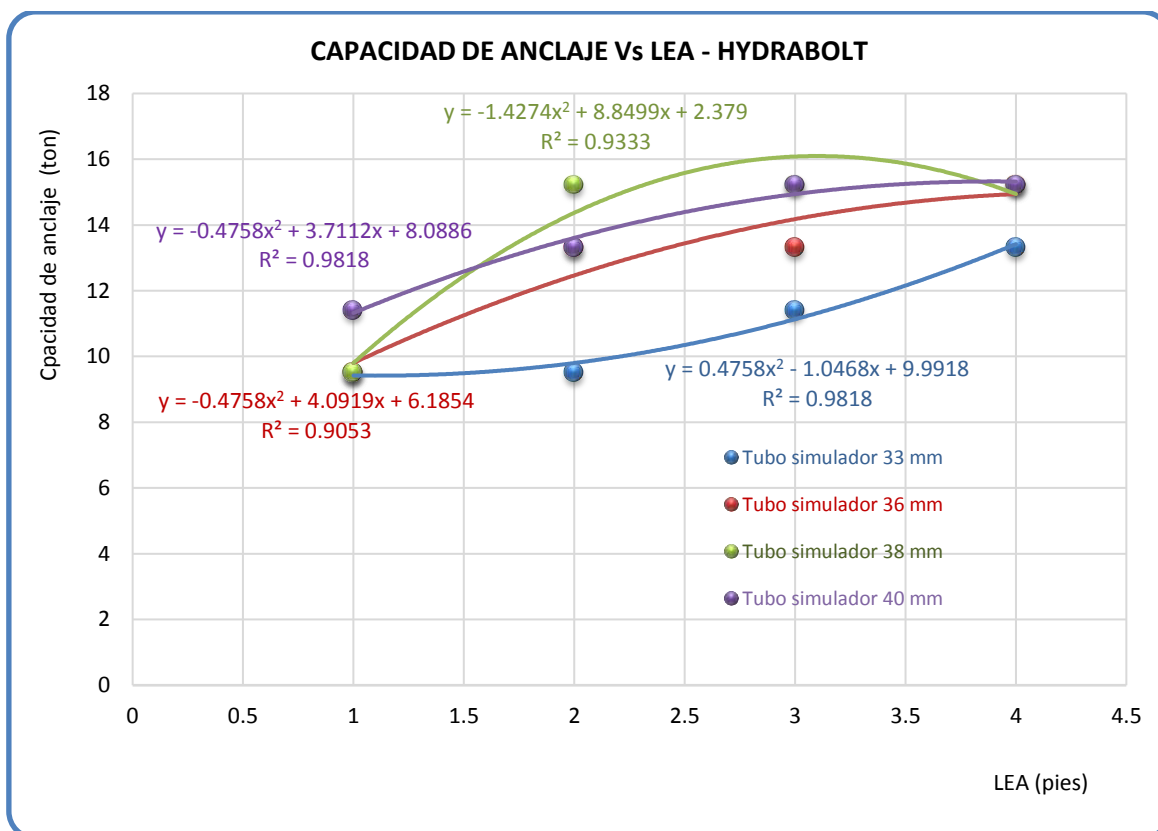


Figura 99. Capacidad de Anclaje de los Pernos Hydrabolt en Función de la LEA

Fuente: Elaboración propia.

## 5.2 Capacidad de Anclaje en Función del Diámetro del Tubo Simulador

A partir de los resultados presentados, similares a los mostrados en el Anexo A-2, se obtiene en resumen la tabla 16, que muestra las capacidades de anclaje del Hydrabolt en función del diámetro del tubo simulador para las 4 LEAs ensayadas, esta correspondencia explicita la figura 100, de donde se puede extraer las siguientes conclusiones: Las capacidades de anclaje aumenta como crece la longitud efectiva de anclaje, tal es así que, para todos los diámetros en estudio, su capacidad de anclaje es mayor para 4 pies de LEA, seguido por la de 3 pies y así sucesivamente. Las pendientes de las curvas, se muestran ascendentes hasta 38 (38,3 mm) para las LEAs de 2, 3 y 4 pies, mientras que, para 1 pie de LEA, tiende a seguir creciendo más allá de 40 (40,96 mm) de diámetro de tubo simulador. Sin embargo, como se ha indicado arriba, el máximo diámetro interior del tubo simulador sería igual al diámetro exterior original del tubo del que se fabrican estos pernos, es decir, 42,72 mm.

Tabla 16

Capacidad de Anclaje de los Pernos Hydrabolt en Función del Diámetro del Tubo Simulador

Diámetro del tubo simulador (mm)	Capacidad de anclaje (ton)			
	LEA = 1 pie	LEA = 2 pies	LEA = 3 pies	LEA = 4 pies
32.50	9.52	9.52	11.42	13.32
36.56	9.52	13.32	13.32	15.23
38.53	9.52	15.23	15.23	15.23
40.96	11.42	13.32	15.23	15.23

Fuente: Elaboración propia.

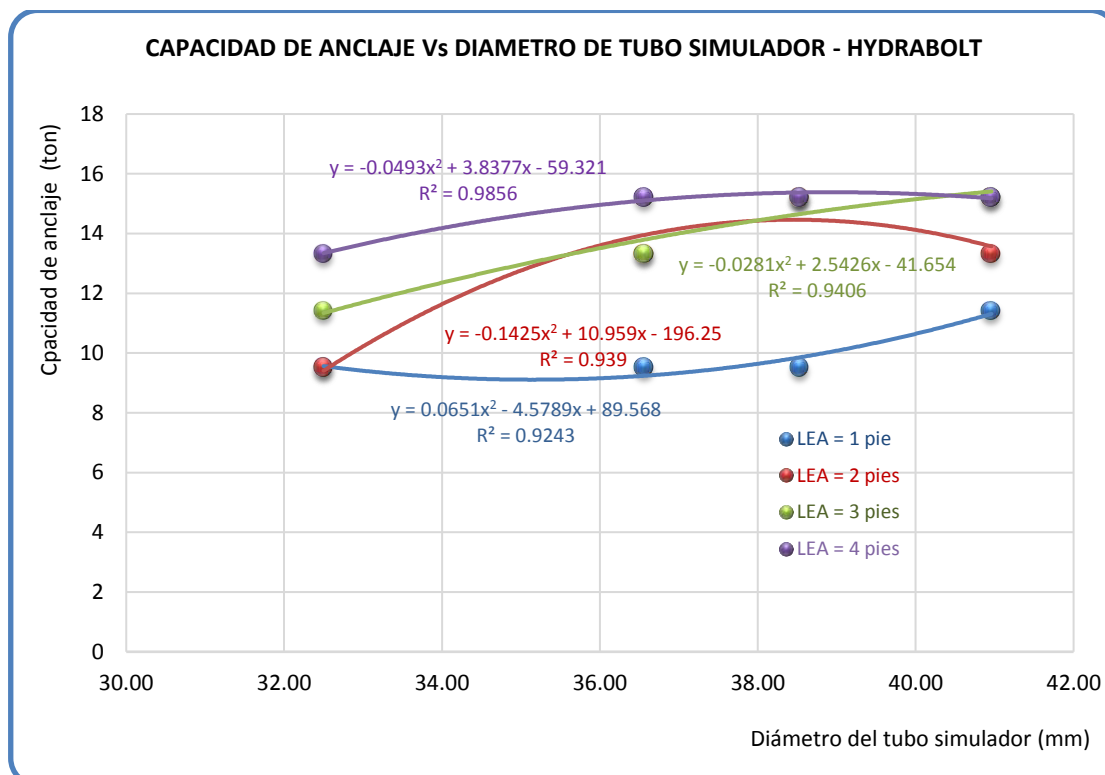


Figura 100. Capacidad de Anclaje de los Pernos Hydrabolt en Función del Diámetro del Tubo Simulador

Fuente: Elaboración propia.

### 5.3 Elongación en Función de la Carga Aplicada y Diámetro del Tubo Simulador

Los resultados referentes a la elongación de estos pernos, se presenta como modelo en el Anexo A-2, de donde se deduce que guarda una relación lineal con la carga, como puede observarse en la figura 101, sufren mayor elongación cuando se instalan en tubos de simuladores de 40,96 mm (40 mm) y menor en tubos simuladores de 32,5 mm (33 mm).

### 5.4 Contactos y Aberturas en Función del Diámetro del Tubo Simulador

Para hacer este análisis, se seccionaron muestras de Hydrabolt antes y después de su instalación en los diferentes diámetros de tubos simuladores, en el taller metal mecánico; luego puliendo y haciendo uso de navajas y lengüetas de acero, se delataron los contactos y

aberturas para cada combinación de perno y tubo. Con dichos trabajos previos, se muestra que los Hydrabolt (inflando dentro de taladros o tubos simuladores), no se acoplan completamente, como apreciarse en la figura 102, que ilustra los diferentes perfiles que presentan los pernos Hydrabolt desde su perfil original hasta instalado en dentro del tubo simulador de 40 (40,96 mm) de diámetro interior. En tubos simuladores de 33 (32,5 mm) y 36 (36,3 mm), se generan 3 aberturas incluyendo debido al pliegue del perno; mientras que en tubos de 38 (38,3mm) y 40 (40,96 mm), se generan 4 aberturas.

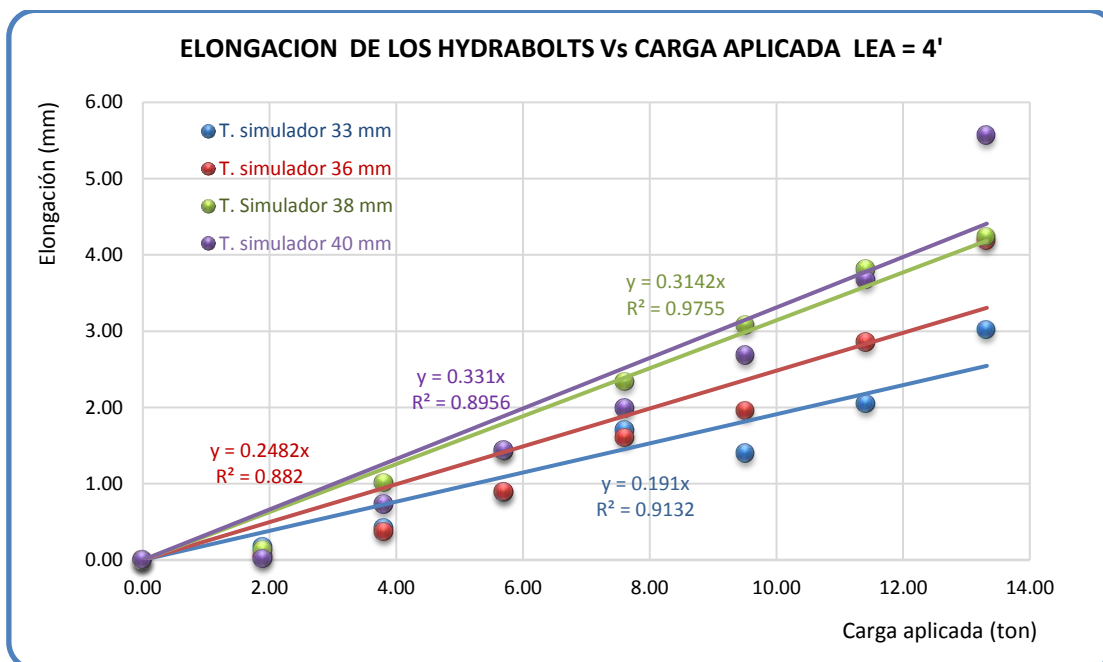


Figura 101. Elongación de los Hydrabolt para 4 pies de LEA en Diferentes Tubos Simuladores.  
Fuente: Elaboración propia.



Figura 102. Acoplamiento de los Hydrabolt en Diferentes Diámetros de Tubos Simuladores.  
Fuente: Elaboración propia.

Calibrando los contactos y aberturas que se generan al instalar los pernos Hydrabolt dentro de los tubos simuladores, se llega a determinar las áreas de la pared exterior del perno que hacen contacto, mejor dicho que hacen anclaje, se presenta en la tabla 17 resumido de los valores presentados en el Anexo C-2, donde se aprecia que en tubo de 40,96 mm se aprecia mayor área de contacto, pero mayor área sin contacto debido al pliegue, resultado que también puede visualizarse mejor en la figura 103.

Tabla 17

Áreas con o sin Contacto en los Pernos Hydrabolt en Diferentes Diámetros de Tubos Simuladores

Diámetro del tubo simulador (mm)	Área de contacto (%)	Área sin contacto (%)	Área sin contacto debido al pliegue (%)
32.5	46.86	53.14	12.28
36.3	46.56	53.44	13.62
38.3	55.82	44.18	13.31
40.96	60.93	39.07	16.85

Fuente: Elaboración propia.

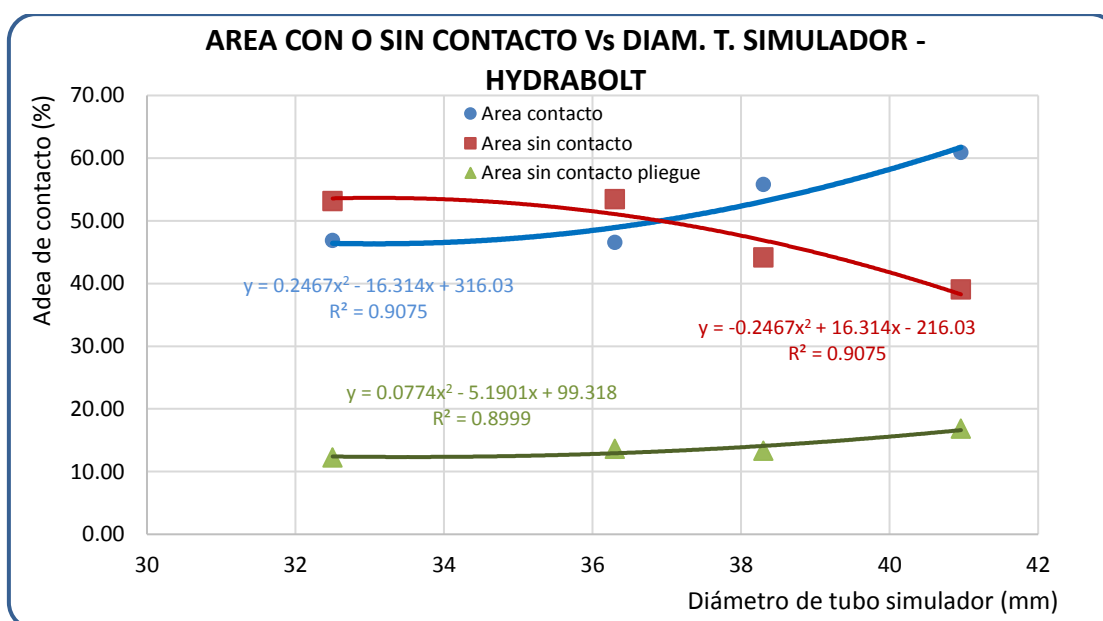


Figura 103. Áreas con o sin Contacto de los Pernos Hydrabolt en Diferentes Tubos Simuladores.

Fuente: Elaboración propia.



## Capítulo 6

### Resultados del Estudio de los Pernos Inflables X-Pandabolt (Swellex)

Al igual que para los pernos Hydrabolt, visto en el capítulo anterior, además de analizar las capacidades de anclaje de los pernos X-Pandabolt instalados en tubos simuladores de 32,5; 36,3; 38,3 y 41 mm de diámetro interior, siendo las longitudes efectivas de anclaje (LEA) 1, 2, 3 y 4 pies; se analiza las elongaciones durante las pruebas de arranque. Análogamente, se analizan las aberturas y contactos que se generan cuando se instalan los Swellex (X-Pandabolt) en tubos simuladores de diferentes diámetros.

Los pernos inflables Swellex (X-Pandabolt), cuya estructura es idéntica a la de los Hydrabolt, como ilustra la figura 104. Estos pernos son fabricados igual que otros pernos de su tipo como el Swellex, Expanbolt, Python, entre otros, como se ha detallado en el capítulo anterior.



*Figura 104. Perno Inflable Swellex (X-Pandabolt) Visto de su Cabeza Hacia su Cola*  
Fuente: Elaboración propia.

Al igual que los Hydrabolt, los X-Pandabolt están sellados por ambos extremos con bujes o manguitos soldados para permitir su inflado. Como puede observarse en la figura 104, el buje de la cabeza es coronada con una pestaña, similar a una brida, que a su vez porta la válvula de ingreso de agua, en esta figura se observa cubierta por un capuchón amarillo. Su inflado, es bajo las mismas condiciones que los pernos Hydrabolt, la diferencia estriba en que una vez alcanzada dicha presión, ésta se descarga, quedando el agua en el interior de los X-Pandabolt a la presión atmosférica, esto debido a que la aguja que hace las veces de

una check en los Hydrabolt, con una forma cilíndrica, en los X-Pandabolt tiene la forma de cruceta, como puede apreciarse en las figuras 105 (a) y 105 (b). En los X-Pandabolt, esta aguja sirve básicamente para el control del adecuado inflado e identificar su longitud de acuerdo al código de colores establecido por el fabricante, como ilustra la figura 105 (b).

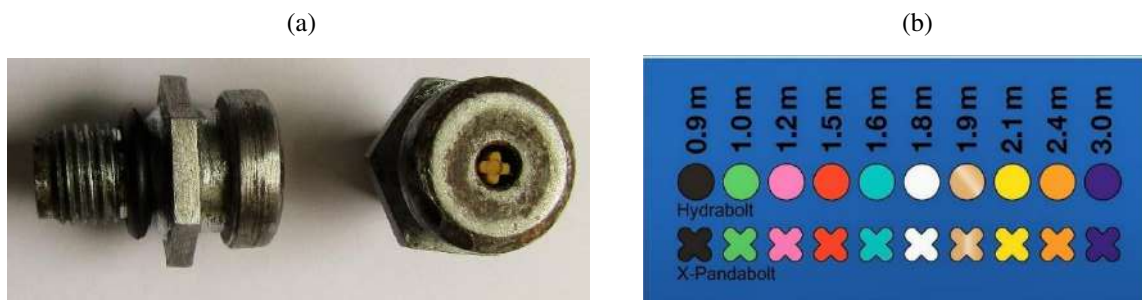


Figura 105. Válvula del Perno X-Pandabolt Visto de Perfil y Frente. (b) Código de Colores de las agujas según la Longitud de los Pernos Hydrabolt y X-Pandabolt

Fuente: (a) Elaboración propia y (b) New Concept Mining.

Al igual que los Hydrabolt se presentan en 3 modelos: X-PANDABOLT NT, X-PANDABOLT NORMAL y X-PANDABOLT  $\Phi$  29. Donde los 2 primeros tienen diámetro nominal de 26 mm y el tercero 29 mm y con longitudes que van de 0,9 a 3,0 m (3 – 10 pies), identificables por el color de las agujas presentado en la figura 105 (b).

Los 64 pernos X-Pandabolt utilizados en el presente estudio fueron X-Pandabolt  $\Phi$  29, donados por la Cía. New Concept Mining Perú, que tienen un diámetro nominal de 29 mm y todos de 7 pies de longitud (2,1 m). La tabla 18, presenta las partes y sus dimensiones promedio de los pernos X-Pandabolt calibrados con vernier digital a un conjunto de 3 es estos pernos, procediendo similar que para los Hydrabolt, en esta tabla se puede apreciar que el diámetro a lo alto de la sección en “C” es de 28,57 mm y a lo ancho 27,07 mm, estos promedios se ha obtenido haciendo calibraciones en tres posiciones sobre el perno, 2 a 16 cm de los extremos del X-Pandabolt y uno en el centro, en cada posición a lo alto y ancho de la sección en “C”.

El buje o manguito de la cabeza pestañada, soldado en uno de los extremos del perno, tiene 32 mm de diámetro y 57 mm de longitud, la pestaña (en forma de brida) tiene 3 mm de espesor y 46 mm de diámetro, cuya función es sujetar las planchuelas con las que se instalan los pernos. Sobre la pestaña, lleva soldada la válvula para el inflado en cuya garganta de 3.5 mm, se engancha el gancho de la boquilla de inflado que ilustra la figura 105 (a), tiene 16 mm de diámetro y 11 mm de longitud sin considerar el tramo enroscado. El manguito de la

cola, tiene 30 mm de diámetro y 29 mm de longitud. La separación de los extremos de la "C" o abertura es de 3,32 mm en promedio.

*Tabla 18*

*Partes y Dimensiones Promedio de los Pernos X-Pandabolt de 7 pies*

Dimensiones promedio de los pernos X-Pandabolt	Longitud total del perno (desde el exterior de la pestaña - extremo de la cola) (7 pies)	2100,00	mm
	Longitud del cuerpo (descontando la longitud de bujes)	2013,00	mm
	A lo alto de la "C"	28,57	mm
	A lo ancho de la "C"	27,07	mm
	Espesor de la pared	2,00	mm
Buje de la cabeza	Longitud (incluyendo espesor de la pestaña)	57,00	mm
	Diámetro del buje	32,00	mm
	Diámetro de la pestaña (mm)	46,00	mm
	Espesor de la pestaña	3,00	mm
	Longitud de la válvula (sin considerar la parte enroscada)	11,00	mm
	Diámetro de la válvula (cabeza de válvula)	16,00	mm
	Diámetro del agujero de la válvula por donde ingresa el agua	4,00	mm
Buje de cola	Longitud	30,00	mm
	Diámetro	29,00	mm
Separación de los bordes de la "C" promedio (medido en la cabeza, centro y cola)		3,32	mm

Fuente: New Concept Mining.

La longitud muerta de los X-Pandabolt, es decir, la longitud que no hace anclaje, debido a los bujes en la cabeza y cola, son respectivamente: 5,7 cm y 3,0 cm; es decir 8,7 cm, a esto se debe sumar la conicidad que se forma entre los bujes y la pared de los taladros o tubo simulador durante su inflado, es así que, en la cola se genera un tronco de cono de 3 cm de alto y en la cabeza 2,0 cm, que tampoco hacen anclaje. Por consiguiente, la longitud muerta sería 13,7 cm.

## 6.1 Capacidad Anclaje En Función De La LEA

La capacidad de anclaje promedio de los pernos X-Pandabolt (Swelllex) instalados en los diferentes diámetros de tubos simuladores en función de la LEA se presenta en la tabla 19 (ver en detalle en el Anexo A-3), graficando los valores correspondientes se obtiene la figura 106; en cuyos resultados se observa que la capacidad de anclaje de estos pernos es mayor cuando se instalan en tubos de 40,96 mm (40 mm), seguido por el de 38,3 mm (38 mm), en estos dos casos, la capacidad de anclaje es creciente hasta 3 pies de LEA, a partir del cual, se torna asintótica. Esto demuestra que usar estos pernos con LEAs superiores a 3 pies de LEA, es innecesario.

Para los casos de los pernos Swellex (X-Pandabolt) instalados en tubos simuladores de 32,5 y 36,3 mm (33 y 36 mm), se observa otro comportamiento, puesto que

las curvas tienen pendiente ascendente hasta más allá de los 4 pies de LEA, como puede corroborarse en la figura 106.

Tabla 19

Capacidad de Anclaje de los Pernos X-Pandabolt Instalados en Tubos Simuladores en Función de la Longitud Efectiva de Anclaje

Longitud efectiva de anclaje (pies)	Capacidad de anclaje (ton)			
	33 mm	36 mm	38 mm	40 mm
1	1.43	4.76	6.50	8.41
2	2.38	6.34	12.13	13.32
3	3.57	9.52	13.32	15.23
4	8.33	13.80	15.23	15.23

Fuente: Elaboración propia.

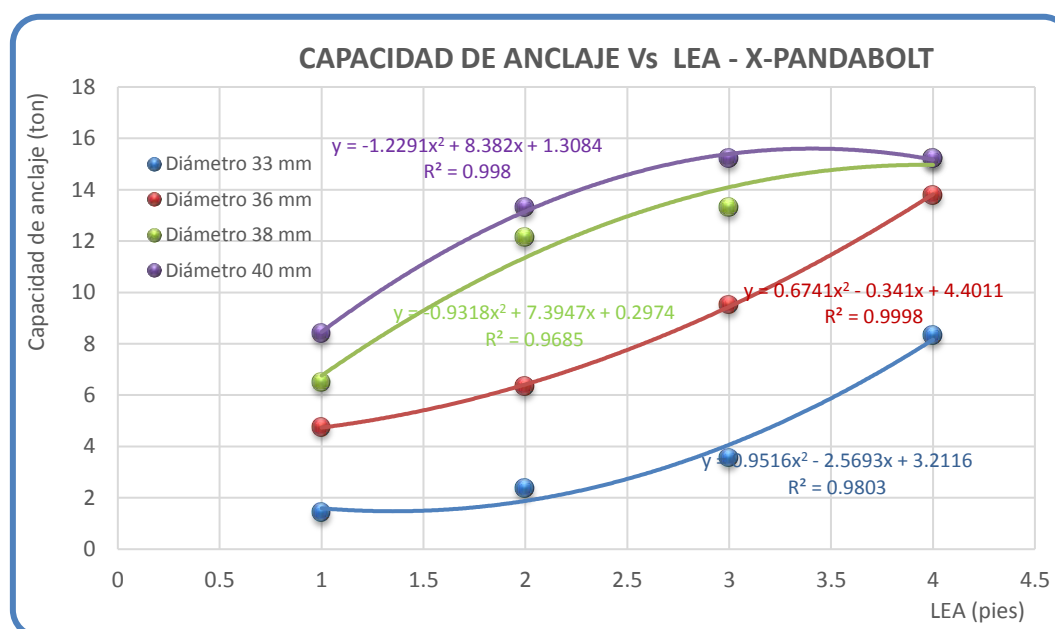


Figura 106. Capacidad de anclaje de los pernos X-Pandabolt para diferentes diámetros Vs LEA

Fuente: Elaboración propia.

## 6.2 Capacidad de Anclaje en función del Diámetro del Tubo Simulador

Análogo al caso anterior, el detalle de los resultados de esta cualidad se presenta en el Anexo A-3, cuyos promedios son los que ilustra la tabla 20 y la figura 107, del que se concluye que la capacidad de anclaje de los X-Pandabolt, crece como aumenta la LEA. Por consiguiente, los Swellex (X-Pandabolt) muestran mayor capacidad de anclaje para 4 pies de LEA y la menor capacidad para 1 pie. En términos generales, se concluye que el mejor diámetro para la instalación de los X-Pandabolt es 40 mm, como puede observarse en la figura 107.

Tabla 20

Capacidad de Anclaje de los Pernos X-Pandabolt para diferentes LEAs y Diámetros de Tubo Simulador

Diámetro interior del tubo simulador (mm)	Capacidad de anclaje de los pernos Swellex (X-Pandabolt) Vs Diámetro (ton)			
	1	2	3	4
32.50	1.43	2.38	3.57	8.33
36.30	4.76	6.34	9.52	13.80
38.30	6.50	12.13	14.27	15.23
40.96	8.41	13.32	15.23	15.23

Fuente: Elaboración propia.

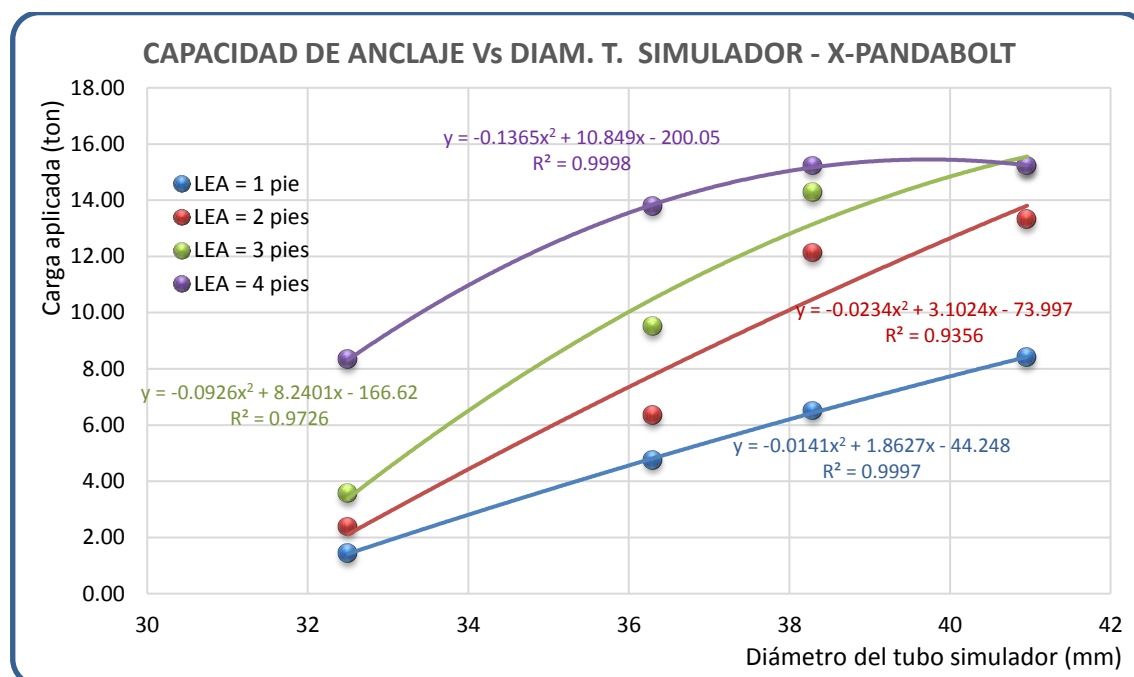


Figura 107. Capacidad de anclaje de los pernos X-Pandabolt para diferentes LEAs Vs diámetro de tubo simulador

Fuente: Elaboración propia.

### 6.3 Elongación en función de la Carga Aplicada y Diámetro del Tubo Simulador

La tabla 21, presenta el resumen de las elongaciones mostradas por los pernos X-Pandabolt instalados en diferentes tamaños de tubos simuladores para 4 pies de LEA en función de la carga aplicada, tomado como modelo de los valores mostrados en el Anexo A-3. Graficando los valores correspondientes, se obtiene la figura 108, donde se aprecia que la elongación es más prominente cuando los X-Pandabolt se instalan en tubos simuladores de 36,3 mm (36 mm) y más bajo en tubos simuladores de 32,5 mm (33 mm). Los X-Pandabolt instalados en tubos simuladores de 38,3 y 40,96 mm (38 y 40 mm), muestran elongaciones muy similares en un rango intermedio que para los casos anteriores. Por ejemplo, para 11,42 ton de carga, las elongaciones son: 1,39; 4,37; 3,63 y 3,82 mm para los respectivos diámetros de 33, 36, 38 y 40 mm.

Tabla 21

Resumen de la Elongación de los Pernos X-Pandabolt Vs Carga Aplicada en Diferentes Diámetros para 4 pies de LEA

Carga (ton)	Elongación para 4 pies de LEA (mm)			
	33 mm	36 mm	38 mm	40 mm
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.90	0.02	0.44	0.15	0.14
3.81	0.05	1.04	0.49	0.77
5.71	0.27	1.66	1.49	1.21
7.61	0.66	2.59	1.97	2.03
9.52	0.93	3.45	2.80	2.83
11.42	1.39	4.37	3.63	3.82
13.32	1.80	5.46	6.15	5.92

Fuente: Elaboración propia.

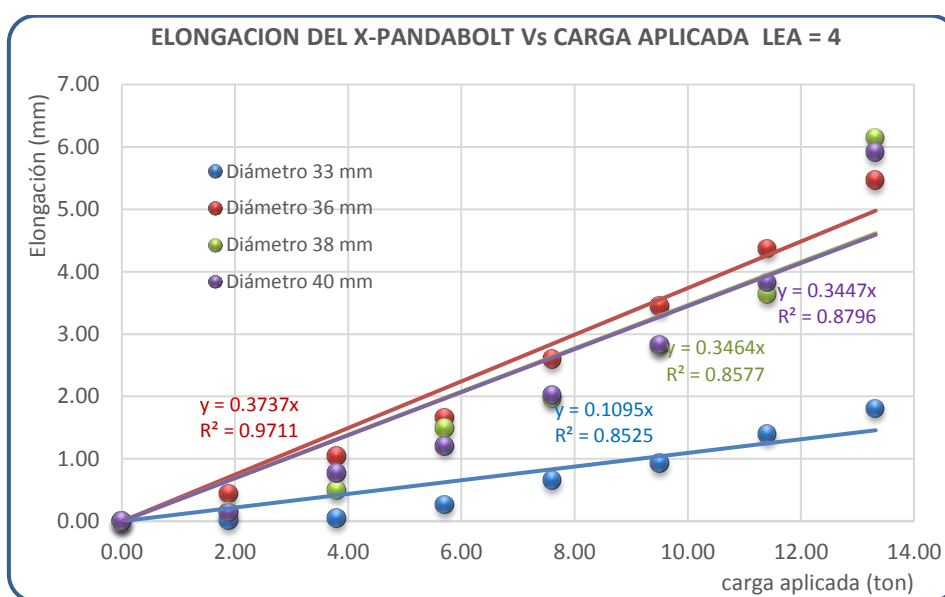


Figura 108. Elongación de los X-Pandabolt para 4 pies de LEA

Fuente: Elaboración propia.

## 6.4 Discusión de Contactos y Aberturas en Función del Diámetro del Tubo

### Simulador

Al igual que en el caso de los pernos Hydrabolt, cuando se instalan los pernos X-Pandabolt (Swellex), se generan franjas de aberturas como puede apreciarse en la figura 109, que presenta los diferentes perfiles de los pernos Swellex (X-Pandabolt) desde antes del inflado hasta completamente inflado al aire libre. Cuando se instalan en tubos simuladores de 32,5 y 36,3 mm (33 y 36 mm), se generan 3 aberturas (incluyendo abertura debido al pliegue); mientras que en tubos simuladores de 38,3 y 40,96 mm (38 y 40 mm), se generan 4 y 5 aberturas, respectivamente.



Figura 109. Perfiles de los pernos Swellex (X-Pandabolt) de acuerdo al diámetro del tubo simulador  
Fuente: Elaboración propia.

Realizada las calibraciones de los contactos y aberturas que se generan entre la pared exterior de los pernos y la pared interior de los tubos simuladores, como muestra la figura 109, se llegó a determinar las áreas de contacto expresado en porcentaje (ver Anexo C-3), tomando como 100 % el área de la pared exterior del perno completamente inflado que ilustra la figura 109 en su extremo derecho; estos resultados se presenta en resumen en la tabla 22 y la figura 110, de los cuales se concluye que los X-Pandabolt instalados en tubos simuladores de 40,96 mm (40 mm), muestran mayor porcentaje de contacto (51,96 %), mientras que el porcentaje más bajo adquiere en tubos de 32,5 mm (33 mm), con un valor de 41,68 %. Sin embargo, en tubos simuladores de 32,5 mm el área sin contacto debido al pliegue es menor que en los otros casos (12,69 %), adquiriendo el valor más alto en tubos simuladores de 36,3 mm (16,13 %).

Tabla 22

Áreas con o sin Contacto de los Pernos Swellex (X-Pandabolt)

Diámetro del tubo simulador (mm)	Área de contacto (%)	Área sin contacto (%)	Área sin contacto debido al pliegue (%)
32.5	41.68	58.32	12.69
36.3	47.81	52.19	16.13
38.3	47.54	52.46	14.95
40.96	51.96	48.04	13.98

Fuente: Elaboración propia.



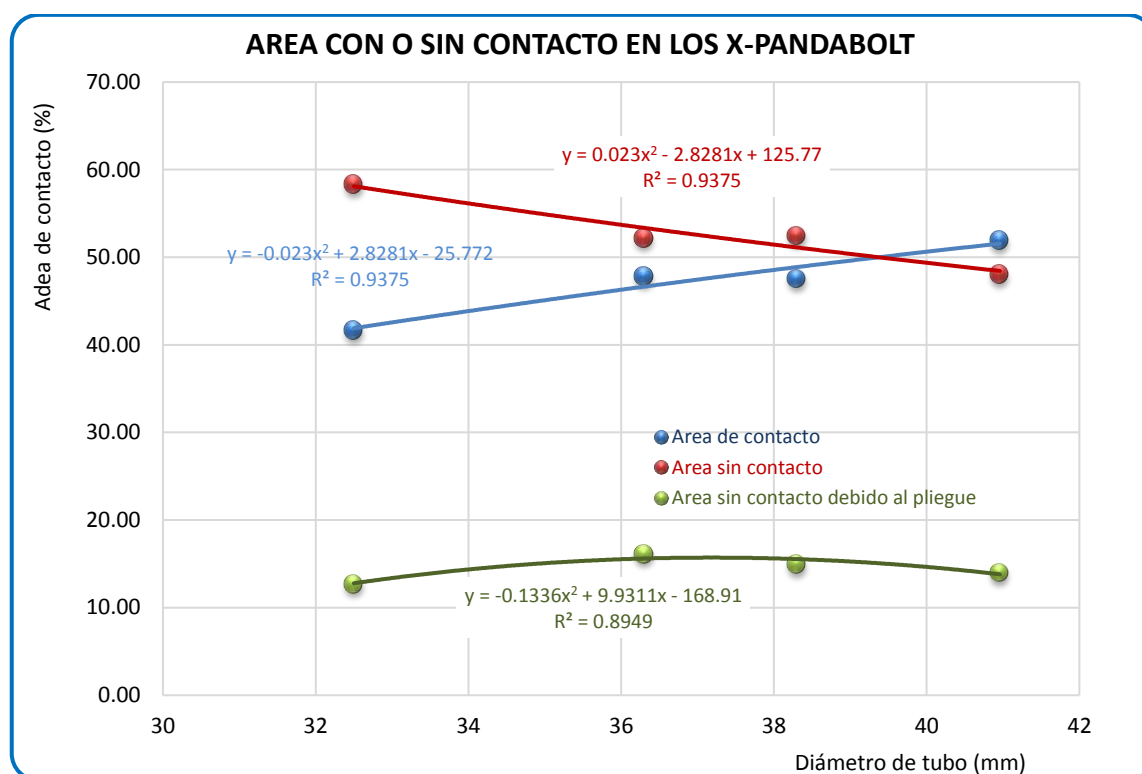


Figura 110. Areas con o sin Contacto de los Swellex (X-Pandabolt) Vs Diámetro del Tubo Simulador.  
Fuente: Elaboración propia.

## Capítulo 7

### Resultados del Estudio de las Barras Helicoidales

Las Barras Helicoidales, son herramientas de acero diseñados ex profesamente para sostenimiento de macizos rocosos en excavaciones superficiales y subterráneas. Son laminadas en caliente con resaltes en forma de rosca helicoidal izquierdo continua de amplio paso, cuya composición química y propiedades cumplen con lo que establece la norma ASTM A615 Grado 75 (Minova, URL).

La figura 111, ilustra las barras helicoidales de 7 pies de longitud utilizadas para el presente estudio, que fueron donadas por la Cía. Minera Poderosa. Tiene las siguientes características: Diámetro nominal 22 mm, diámetro exterior 24 mm, peso unitario 2,8 Kg/m, fluencia 200 KN, tracción 270 KN (Minova, URL).



*Figura 111. Barras helicoidales.*

Fuente: Elaboración propia.

## 7.1 Resultados del Estudio de Las Barras Helicoidales Instaladas con Cartuchos de Cementicio

Los Cartuchos Cementicios para anclajes son productos diseñados especialmente para la fijación de pernos helicoidales, pernos de barra corrugada, cable bolting. Son formulados en base a una mezcla de conglomerados hidráulicos de alta velocidad de reacción que contiene una base de cemento portland tipo “I”, además de aditivos especiales. Su utilización permite obtener entre 4 a 6 horas una resistencia del perno superior a 8 toneladas para longitudes de anclaje superiores a 1.6m (5 pies) (Minova, URL).

El cementicio “REM-BOLT”, se presenta envasado en bolsas plásticas de 0,07 mm de espesor, 29 mm de diámetro y 370 mm de longitud. El fondo de la bolsa se presenta sellado y el otro abierto para rellenar el cementicio a lo largo de 300 mm, que luego es cerrado haciendo dobleces y engrapado con grapas, teniéndose así los cartuchos. Asimismo, los cartuchos tienen varias hileras de perforaciones en toda su longitud, siendo el diámetro de las perforaciones de alrededor de 1 mm y en número de entre 70 y 85, cuya función es permitir el ingreso de agua dentro de los cartuchos para humedecer el cementicio.

El mortero de cementicio para instalar pernos de roca REM-BOLT, se comercializa encartuchados y embalados en cajas de cartón, como ilustrado en la figura 112. Según el fabricante, los cartuchos de cementicio que muestra la figura 112, tienen un diámetro de 30 mm y 305 mm de longitud. Como recomienda Minova, antes de introducir dentro de los taladros los cartuchos de cementicio deben remojarse en un recipiente con agua por espacio de 10 minutos y no más de 30 minutos.

Los cartuchos cementicio REMBOLT tienen una fecha de vencimiento de 6 meses después de su fabricación, siempre y cuando se tenga almacenados en un lugar sin humedad, en su caja original y a una temperatura entre los 5°C y 40°C.

**7.1.1 Capacidad de Anclaje en función de la LEA.** Las capacidades de anclaje promedios de las barras helicoidales instalados con cartuchos de cementicio en diferentes diámetros de tubo simulador en función de la longitud efectiva de anclaje (LEA), se presenta en la tabla 23, resumido de los resultados presentados en el Anexo A-4. Donde se observa que alcanzan su mayor capacidad de anclaje cuando se instalan en tubos simuladores de (32,5 mm) seguido por el de 42 mm, como también puede apreciarse en la figura 113.

Como puede apreciarse en la figura 113, para 32,5 mm y 38,3 mm de diámetro de tubo simulador, la capacidad de anclaje se manifiesta ascendente hasta 3 pies de LEA,

mientras que para 36,3 y 42 mm se manifiesta hasta 4 pies de LEA. Por consiguiente, el diámetro óptimo para instalar las barras helicoidales con cartuchos de cementicio es 32,5 mm. Si bien la alternativa de 42 mm de diámetro de tubo simulador, también resulta apropiado técnicamente, pero no lo es económicamente, dado que el costo de la perforación de taladros de ese diámetro será mucho mayor que de 32,5 mm y también el costo de los cartuchos de cementicio será mayor (mayor número de cartuchos por cada pie de talado o tubo).



Figura 112. Cartuchos de cementicio en su caja y bolsa original  
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 23

*Capacidad de Anclaje de la Barra Helicoidal Instalada con Cartuchos de Cementicio en Función de la LEA*

LEA (pies)	Capacidad de anclaje (ton)			
	Diam. T. Sim. = 33 mm	Diam. T. Sim. = 36 mm	Diam. T. Sim. = 38 mm	Diam. T. Sim. = 42 mm
1	15.88	7.94	3.97	2.48
2	20.83	9.59	11.25	11.91
3	21.00	13.89	13.89	17.37
4	21.67	13.89	13.56	21.34

Fuente: Elaboración propia.

**7.1.2 Capacidad de Anclaje de las Barras Helicoidales Instaladas con Cartuchos de Cementicio Vs Diámetro del Tubo Simulador.** Las capacidades promedias de anclaje de las barras helicoidales instaladas con cartuchos de cementicio en función del diámetro de los tubos simuladores para las diferentes LEAs, presenta la tabla 24 (ver en detalle en el Anexo A-4), donde se observa que alcanzan su mayor capacidad de anclaje para 4 pies de LEA y los valores más bajos para 1 pie, como ilustra también la figura 114. Para

diámetro de 32,5 mm, se observan las mayores capacidades de anclaje, a partir de estos valores comienzan a descender, optando los valores más bajos para diámetros de entre 37 y 39 mm para LEAs de 1, 2 y 3 pies. Para la LEA de 4 pies el mínimo valor de la capacidad de anclaje alcanza para 36,3 mm de diámetro de tubo simulador.

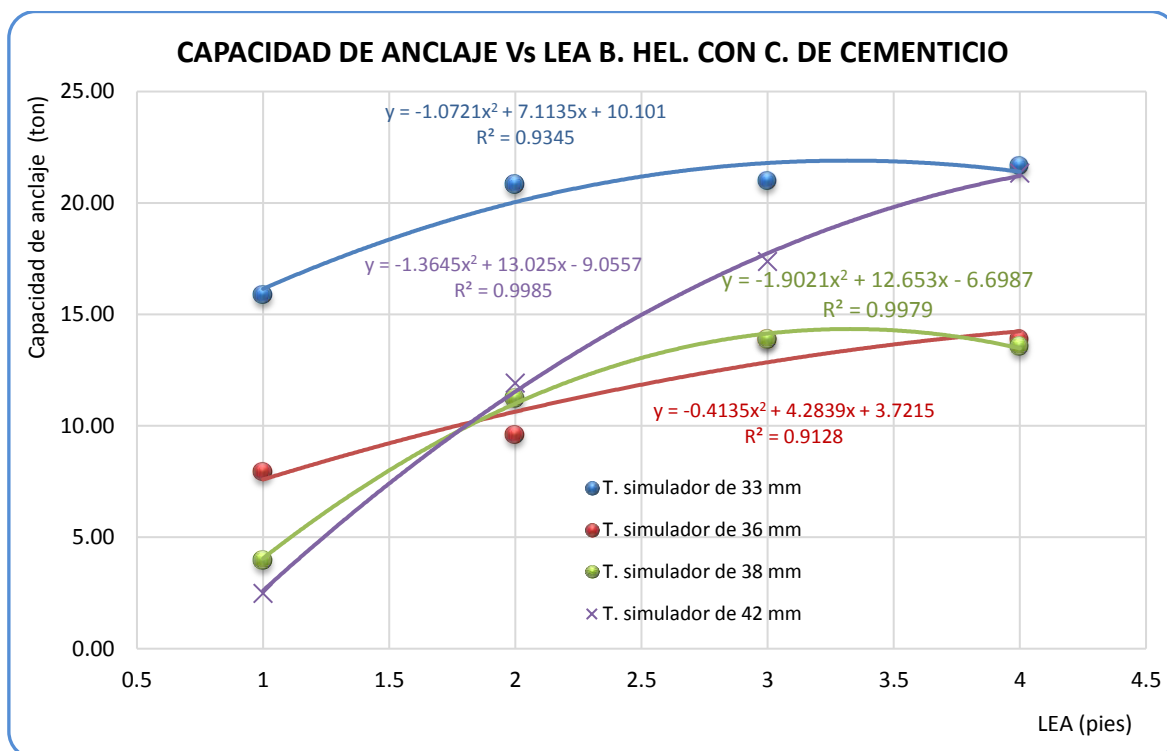


Figura 113. Capacidad de Anclaje de las Barras Helicoidales Instaladas con Cartuchos de Cementicio en Función de la LEA

Fuente: Elaboración propia.

Se observa también que, luego de alcanzar las capacidades de anclaje mínimas para los diámetros antes indicados, comienzan ascender al menos hasta el diámetro más grande ensayado (42 mm) para las LEAs de 1, 2 y 3 pies.

Tabla 24

Capacidad de Anclaje de las Barras Helicoidales Instaladas con Cartuchos de Cementicio en Función del Diámetro de los Tubos Simuladores

Diámetro del tubo simulador (mm)	Capacidad de anclaje Vs diámetro de tubo simulador (pies)			
	LEA = 1	LEA = 2	LEA = 3	LEA = 4
32,50	15,88	20,83	21,00	21,67
36,30	7,94	9,59	13,89	13,89
38,30	3,97	11,25	13,89	17,37
42,00	2,48	11,91	17,37	21,34

Fuente: Elaboración propia.

**7.1.3 Elongación en función de la Carga Aplicada y Diámetro del Tubo Simulador.** Análogo que, para los resultados anteriores, los valores de esta cualidad para esta combinación, se presentan en detalle como modelo en el Anexo A-4. La elongación de

la barra helicoidal instalada con cartucho de cementicio, se manifiesta con los valores más altos en diámetro de tubo simulador de 36,3 mm y más bajo para los diámetros de 32,5 mm y 38,3 mm. Asimismo, la elongación para los diámetros de 32,5 y 38,3 mm son similares, como puede apreciarse en la figura 115.

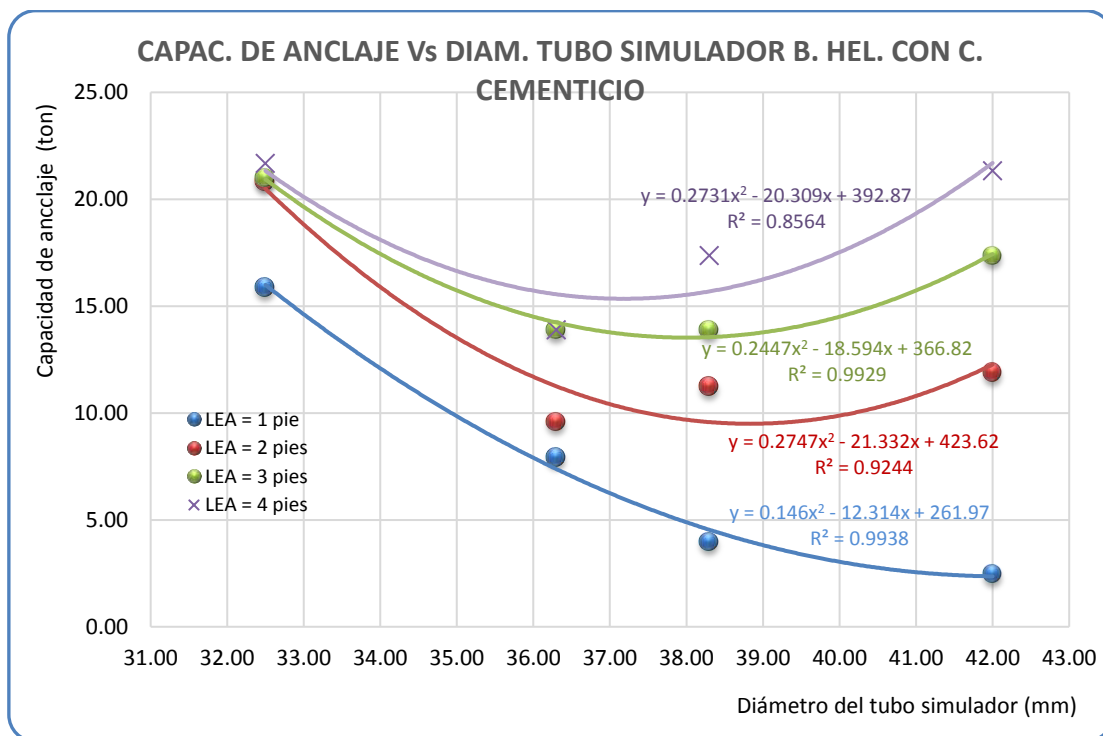


Figura 114. Capacidad de Anclaje de las Barras Helicoidales Instaladas con Cartuchos de Cementicio en Función del Diámetro de los Tubos Simuladores.

Fuente: Elaboración propia.

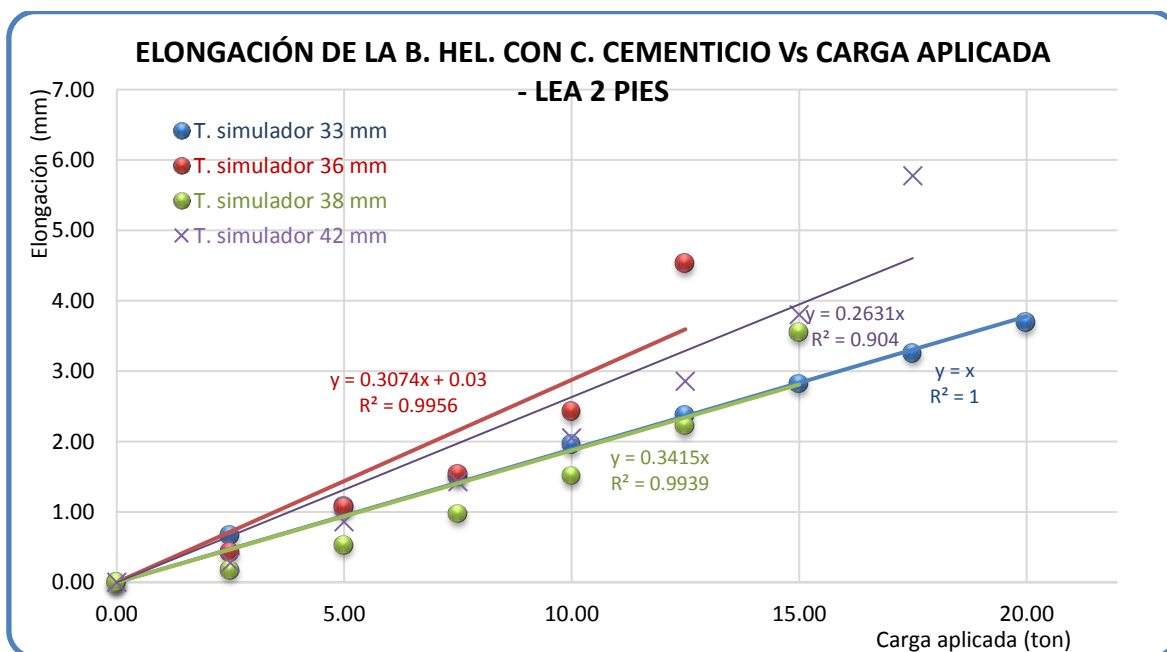


Figura 115. Elongación de las Barras Helicoidales Instaladas con Cartucho de Cementicio

Fuente: Elaboración propia.

**7.1.4 Propiedades Físicas del Cementicio Fraguado Dentro de los Tubos Simuladores.** Para determinar las propiedades del cementicio fraguado o curado, el acoplamiento entre la barra helicoidal y las paredes interiores de los tubos simuladores, posición de la barra, estado y posición del envoltorio plástico, entre otros aspectos, inicialmente se planificó hacer seccionamiento transversal y longitudinal de las muestras seleccionadas, como se detalla en el anexo D-1. Sin embargo, el seccionamiento longitudinal de pernos completos no pudo concretarse, por cuanto los talleres metal mecánicos no disponían de equipos de corte apropiados; por lo cual, se hizo seccionamientos transversales y longitudinales de segmentos únicamente de 10 a 12 cm de longitud.

Las propiedades macroscópicas que se presentan en el anexo E. se determinaron de las muestras seccionadas, por observación y medición directa; mientras que las propiedades como: rugosidad, dureza, porosidad, ultrasonido, adherencia, etc. Como se indicó anteriormente, se determinaron en el laboratorio de Máquinas y Herramientas de la Facultad de Ingeniería Industrial, cuyo informe se ilustra en el Anexo E. Los ensayos correspondientes para determinar la densidad, absorción de agua, etc., se llevaron a cabo en la Escuela de Ing. Metalúrgica de la UNMSM.

**A) *Posición de la barra helicoidal dentro del tubo simulador.*** Este análisis se hizo sobre las muestras seleccionadas para cada diámetro ensayado, evaluándose la posición de las barras en cada segmento y a lo largo del tubo simulador, para lo cual se definieron las siguientes posiciones:

- Centrado: Cuando el eje del perno coincide con el eje del tubo simulador.
- Ligeramente descentrado: Cuando la barra se presenta posicionado cerca al eje del tubo.
- Descentrado: la barra se presenta cerca a la pared interior del tubo simulador.
- Muy descentrado: Cuando la posición del perno está muy cerca o pegado a pared interior del tubo simulador.

Si bien en algunos segmentos de las muestras seccionadas las barras helicoidales se observan centradas, no significa que el perno esté centrado a lo largo del tubo simulador, esta situación se presenta únicamente por coincidencia del corte. Puesto que, observando la posición global de la barra helicoidal dentro de los tubos simuladores, en la mayoría de los casos, queda descentrada, más detalles al respecto se encuentra en el anexo E. Cabe destacar que, la instalación de todas las barras se llevaron a cabo en posición vertical.



**B) Porosidad.** Esta característica, se analizó visualmente en el corte de cada segmento o probeta, con la ayuda de una lupa, dado que los tamaños de los poros son muy variados, en general de 0,5 a 13 mm. Es decir, se ha contabilizado los poros que podían alcanzarse a ver con lupa, más no los micro poros. Los poros se generan por el aire atrapado durante la instalación de las barras helicoidales y se distribuyen en la masa del cementicio por el batido del mismo.

Como puede apreciarse en las figuras 116, la cantidad de poros (encerrados con círculos rojos) varía de acuerdo al diámetro del tubo simulador, es decir, cuanto más grande es el diámetro del tubo simulador, se genera mayor número de poros. Asimismo, Las Figuras 117, 118 y 119, ilustran la porosidad del cementicio en muestras seccionadas longitudinalmente. En cada una de las figuras, se observa que el cementicio es bastante poroso, sobre todo en su contacto con las paredes interiores de los tubos simuladores. Por otra parte, de acuerdo a los ensayos realizados en el Laboratorio de Máquinas y Herramientas de la Facultad de Ingeniería Industrial de la UNMSM, se ratifica lo antes expresado, tal como se detalla en los Anexos D-1 y E.

**C) Acoplamiento y adherencia.** En los cortes transversales de las muestras, se observa que el acoplamiento del cementicio, en líneas generales, tanto en la barra como en la pared interior de los tubos simuladores, es bastante bueno, independiente del diámetro de tubo del tubo simulador. Asimismo, para observar el acoplamiento del cementicio a lo largo del tubo simulador, se hizo cortes longitudinales a segmentos de muestra de 10 a 12 cm de longitud (al no poder seccionar los pernos en toda su longitud), con la finalidad de observar la facilidad de su desprendimiento tanto de la barra como de la pared interior de los tubos simuladores, como ilustran las figuras 117, 118, 119 y 120. Asimismo, la figura 121 muestra un corte longitudinal de la barra helicoidal instalada con cartucho de cementicio, donde se observa que el acoplamiento tanto en la barra como en la pared interior del tubo simulador, es buena, pero no la adherencia.

La adherencia del cementicio en la barra helicoidal, es mayor que en la pared interior de los tubos simuladores, puesto que al tratar de desprenderlo el cementicio ofrece más resistencia, muestra de ello es que quedan restos de cementicio adheridos en las roscas de la barra helicoidal, como ilustran las figuras 117 (a), 118 (a), 119 (a) y 120 (a), que corresponden a los diámetros de 32,5; 36,3; 38,3 y 42 mm, respectivamente. En las paredes de los tubos simuladores (similar a un taladro en roca) en cambio, se observa que el cementicio tiene poca adherencia, es por ello que se desprende con suma facilidad, dejando

la pared interior de los tubos simuladores limpio, como ilustran las figuras antes indicadas; para iguales diámetros.



(a)



(b)



(c)



(d)

*Figura 116. Porosidad del Cementicio Fraguado en Distintos Diámetros de Tubos Simuladores en Corte Transversal. (a) Diámetro 32,5 mm. (b) Diámetro 36,3 mm. (c) Diámetro 38,3 mm. (d) Diámetro 42 mm. Fuente: Elaboración propia.*

La adherencia del cementicio tanto en la barra helicoidal como en la pared interior del tubo simulador, además de la edad de los cartuchos de cementicio, tiempo de remojo de los cartuchos, tiempo de batido, entre otros, se ve más afectada por los siguientes factores:

a) El envoltorio plástico de los cartuchos, que en unos casos queda enroscado alrededor de la barra helicoidal, como ilustra la figura 118 (a) y en otros, queda pegado en

la pared del tubo simulador impidiendo que el cementicio entre en contacto con dicha pared, evitando la adherencia, como ilustran las figuras 117 (b) y 120 (b).



*Figura 117. Adherencia y Acoplamiento del Cementicio en Tubo Simulador de 32,5 mm. (a) En la Barra Helicoidal. (b) en la Pared del Tubo Simulador.*  
Fuente: Elaboración propia.



*Figura 118. Adherencia y Acoplamiento del Cementicio en Tubo Simulador de 36,3 mm. (a) En la Barra Helicoidal. (b) en la Pared del Tubo Simulador.*  
Fuente: Elaboración propia.



*Figura 119. Adherencia y Acoplamiento del Cementicio en tubo Simulador de 38,3 mm. (a) En la Barra Helicoidal. (b) en la Pared del Tubo Simulador.*  
Fuente: Elaboración propia.



Figura 120. Adherencia y Acoplamiento del Cementicio en Tubo Simulador de 42 mm. (a) En la Barra Helicoidal. (b) En la Pared del Tubo Simulador  
Fuente: Elaboración propia.

b) la presencia de óxido en la superficie de la barra y la pared del tubo simulador, la pátina de óxido actúa como una película repelente, reduciendo la adherencia del cementicio, como puede apreciarse en la figura 119 (b), donde se aprecia que la pátina de óxido de hierro ha impedido que el cementicio se adhiera adecuadamente a la barra helicoidal.

c) Porosidad ocasionada por el aire atrapado durante la instalación de las barras helicoidales, siendo más notorio en diámetros mayores que en los pequeños, como puede apreciarse en las figuras anteriores y en la figura 122 (b), donde se aprecia el cementicio completamente poroso y la pared del tubo simulador donde estuvo en contacto completamente limpio.

Al margen de las condiciones en que se encuentran instaladas las barras helicoidales con cementicio dentro de los tubos simuladores, se realizaron las pruebas de Charpy en la FII, cuyo ensayo se ilustra en la figura 123 (a), para evaluar su comportamiento a los impactos del péndulo. Para lo cual, se utilizaron las probetas preparadas entre otros para este fin, es decir, una probeta por cada diámetro en estudio. Cada probeta fue sometido a 3 niveles de impacto, dejando caer el péndulo de 50°, 60° y 70°, posicionados en el goniómetro que muestra la figura 123 (b).





*Figura 121. Acoplamiento del Cementicio en la Barra Helicoidal y la Pared del Tubo Simulador, Visto en Corte Longitudinal de Muestra.*

Fuente: Elaboración propia.

d) La combinación de los factores anteriores, afectará aún más seriamente la adherencia del cementicio, entre éstas, la combinación de óxido y porosidad como es el caso que ilustran las figuras 122 (a) y 122 (b).



(a)



(b)

*Figura 122. Factores que afectan la Adherencia. (a) Oxido en la Barra Helicoidal. (b) Porosidad en el Cementicio.*

Fuente: Elaboración propia.

La figura 124, ilustra como ejemplo el estado en que iban quedando las probetas para cada ángulo de caída del péndulo Charpy, sobre la barra helicoidal instalado con cementicio en tubo simulador de 42 mm. Para el ángulo del péndulo de 50°, la probeta no sufre daño notorio, como ilustra la figura 124 (a). Cuando se vuelve a ensayar para un ángulo de 60°, el impacto del péndulo produce un ligero desplazamiento del cementicio y la barra, y, una pequeña fisura en la masa del cementicio como puede corroborarse en la figura 124 (b). Finalmente, para el ángulo de 70°, la masa del cementicio es fracturado por varias fisuras desplazado dentro del tubo, como puede apreciarse en la figura 124 (c).



(a)

(b)

Figura 123. Ensayo Charpy para Medir la Adherencia. (a) Equipo Charpy Impactando a la Probeta de la Barra Helicoidal Instalada con Cementicio en Tubo de 42 mm. (b) Goniómetro del Péndulo Charpy.

Fuente: Elaboración propia.

**D) Presencia del envoltorio plástico de los cartuchos.** Los envoltorios plásticos que contenían el cementicio dándole la forma de cartuchos, quedaron englobados en la masa del cementicio en distintas posiciones por el batido durante la colocación de la barra helicoidal dentro del tubo simulador; con tendencia a acumularse en el fondo del tubo simulador, como muestran las figuras 125 (a) y 125 (b).



(a)

(b)

(c)

Figura 124: Estado del cementicio por la acción del péndulo Charpy. (a) Caída de 50°. (b) Caída de 60°. c) Caída de 70°

Fuente: Elaboración propia.



Figura 125. Acumulación del Envoltorio Plástico en el Fondo de los Tubos Simuladores. (a) Tubo Simulador de 38,3 mm. (b) Tubo Simulador de 42 mm.

Fuente: Elaboración propia.

En otros casos, los envoltorios plásticos quedan enroscados o cubriendo a la barra helicoidal, evitando que entre en contacto con el cementicio, muestras de este caso ilustran las figuras 126 (a) y 126 (b), donde la figura 126 (a) muestra a la barra helicoidal cubierto longitudinalmente con el envoltorio plástico; mientras que la figura 126 (b) muestra al envoltorio plástico enroscando a la barra helicoidal longitudinalmente, esta configuración se debe a que durante la instalación la barra helicoidal se penetra dentro de los cartuchos y por efecto de la rotación, el envoltorio plástico se enrosca en la barra helicoidal.



Figura 126. Envoltorio de Plástico Cubriendo a la Barra Helicoidal. (a) En Tubo Simulador de 32,5 mm. (b) En tubo Simulador de 36 mm.

Fuente: Elaboración propia.

Otra configuración que adquieren los envoltorios plásticos es que se presentan pegados a la pared interior de los tubos simuladores, tal como muestran las figuras 127 (a) y



127 (b). En la figura 127 (a), que corresponde a la combinación barra helicoidal – cementicio en tubo simulador de 32,5 mm, donde el envoltorio plástico ha quedado completamente acoplado a la pared interior del tubo simulador, evitando su contacto con el cementicio, comprometiendo su adherencia. Por otro lado, la figura 127 (b) corresponde la barra Helicoidal instalado en tubo simulador de 42 mm, donde parte del envoltorio plástico está en contacto con la pared interior del tubo simulador y otra parte está cubriendo a la barra helicoidal, evitando la adherencia del cementicio en ambas posiciones.

Cabe reiterar que antes de introducir los cartuchos dentro de los tubos simuladores, fueron rasgados longitudinalmente en 4 posiciones y cortados los dobleces engrapados que tienen como cierre los cartuchos en su cabeza, procurando obtener el mejor acoplamiento. Es de destacar que, en las operaciones, por la rapidez de ejecución del empernado de rocas, se evitan estos pasos, únicamente se remojan y se introducen en los taladros, tal cual.



(a)



(b)

*Figura 127. Envoltorio plástico en la pared interior del tubo simulador. (a) en tubo simulador de 33 mm. (b) En tubo simulador de 42 mm*

Fuente: Elaboración propia.

Las figuras 128 de (a) a (d), presentan como muestra, las posiciones del envoltorio plástico vistos en corte transversal para diferentes diámetros de tubos simuladores. En caso del tubo simulador de 32,5 mm, donde se colocaron  $\frac{3}{4}$  de cartucho por pie de tubo, el envoltorio plástico se ha ubicado en 3 posiciones casi puntuales; mientras que en 36,3 mm (1 cartucho por pie), se observa más presencia del envoltorio, que se ha posicionado en dos áreas opuestas completamente plegado. En caso del tubo simulador de 38,3 mm, el

envoltorio plástico se presenta completamente plegado alrededor de 330° muy próximo o pegado a la barra helicoidal como ilustra la figura 128 (c). En tubo simulador de 42 mm, el envoltorio plástico ha quedado englobado en la masa del cementicio casi centrado entre la barra y la pared del tubo simulador, alrededor de 320° aproximadamente, como ilustra la figura 128 (d).

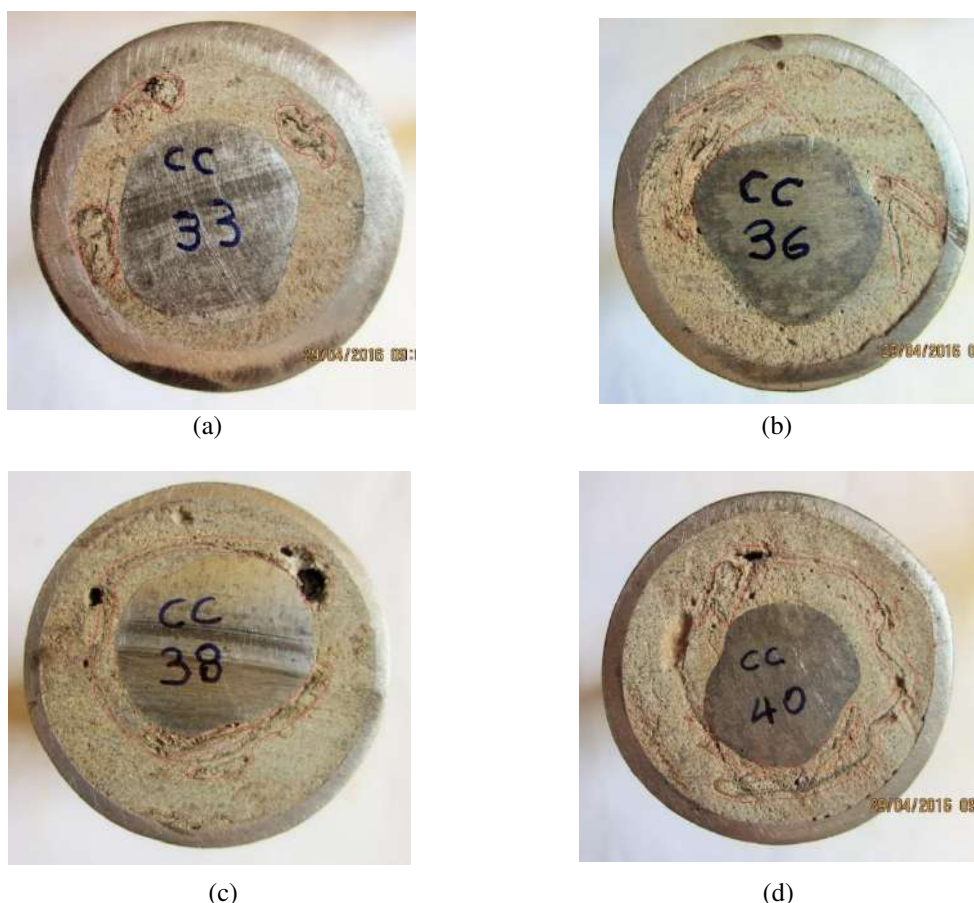


Figura 128. Presencia del Envoltorio Plástico de los Cartuchos de Cementicio. (a) Diámetro 33 mm. (b) Diámetro 36 mm. (c) Diámetro 38 mm. (d) Diámetro 40 mm  
Fuente: Elaboración propia.

**E) Aspereza / rugosidad.** Una apreciación empírica de la rugosidad del cementicio, se llevó a cabo al tacto sobre los segmentos de muestras seccionadas, es decir, sin pulir las superficies de corte para todos los diámetros en estudio. En todos los casos, se aprecia que el cementicio fraguado es áspero al tacto, por los granos de la arena fina que contiene en su formulación.

Como se ha indicado arriba, para la medición de la rugosidad en el laboratorio de la FII, se pulieron las superficies de corte, llevándose a cabo las mediciones como ilustran las figuras 129 (a) y 129 (b) en dos situaciones, antes y después de someter al tratamiento térmico de 200 °C de temperatura. En ambas situaciones y para todos los casos, las

mediciones se hicieron en cuatro posiciones, dos cerca de la barra helicoidal y otros dos cerca de la pared interior de los tubos simuladores.

La figura 129 (b), ilustra a los alumnos asistentes de la FII realizando las mediciones de la rugosidad. Registrando y compilando los valores correspondientes, se obtuvo promedios de rugosidad por zona, por muestra y finalmente un promedio global. Las mediciones antes y después del choque térmico, arrojan promedios globales de  $2,867 \mu\text{m}$  y  $2,655 \mu\text{m}$ , respectivamente, estos resultados indican que, al someter las muestras a  $200^\circ\text{C}$ , la rugosidad del cementicio disminuye ligeramente.



(a)



(b)

Figura 129. Medición de la Rugosidad del Cementicio. (a) Rugosímetro TR 220. (b) Estudiantes de la FII en Proceso de Medición

Fuente: Elaboración propia.

**F) Dureza.** Haciendo uso de la escala de Mohs, se ensayó rayar las probetas de cementicio con cristales de calcita (3) y fluorita (4), apatito (5) y ortosa (6), en la sede de la EP Ingeniería de Minas; llegándose a rayar con el cristal de apatito, del que se colige que, de acuerdo a esta Escala, la dureza sería 5.

En el laboratorio de la FII se midió la dureza usando el durómetro digital TIME Hardness Tester TH 160, cuya precisión es de  $\pm 6 \text{ HLD}$ , que ilustra la figura 130 (a), para dichos ensayos usa el patrón de dureza de una cara Demeq, que presenta la figura 130 (b). Este equipo usa el método normalizado de Leeb, escala HL (Hardness Leeb),

Se ensayaron en ambas bases de las probetas y en cada caso en 4 posiciones, dos cerca de la pared del tubo y dos próximos a la barra helicoidal, con cuyos valores se obtuvo los promedios parciales y totales como presenta la tabla 25. Asimismo, con esos resultados se determinó que la dureza promedio del cementicio sería 319 HL.



(a)

(b)

Figura 130. Ensayos de Dureza en el Laboratorio de la FII. (a) Durómetro Digital Time Hardness Tester TH 160. (b) Patrón de Dureza de una Cara Demeq.

Fuente: Elaboración propia.

**G) Densidad.** Para determinar esta propiedad, fue necesario liberar el anillo de cementicio fraguado entre la barra helicoidal y la pared interior de los tubos simuladores en estudio. Se seccionaron transversalmente muestras de 10 a 12 cm de longitud, luego se cortaron longitudinalmente la pared de los tubos simuladores en 4 posiciones en un taller metal mecánico.

Los pesajes necesarios para determinar la densidad del cementicio fraguado, se llevó a cabo en laboratorio de Biometalurgia de la EP de Ingeniería Metalúrgica de la UNMSM que, entre otros, dispone de la balanza analítica Z OHAUS Triple Beam TJ261, 2610 g x 0,1 g, que se ilustra en las figuras 131 (a) y 131 (b). Para cada diámetro ensayado, se siguió los siguientes pasos: a) Peso de la probeta vacía, b) Peso de la muestra, c) Peso de la probeta con la muestra en su interior, d) Enrasado de agua dentro de la probeta que contiene la muestra hasta 110 cc, e) Peso de la probeta conteniendo la muestra y agua como ilustra la figura 131 (b).

Tabla25

Dureza HL del Cementicio

Diámetro	Promedios de dureza (HL)		
	Base superior	Base inferior	Global
32,50	344,3	344,0	344,1
36,30	303,8	259,8	281,8
38,30	308,0	283,5	295,8
42,00	340,5	367,8	354,1

Fuente: Elaboración propia.



La tabla 26, presenta la densidad del cementicio fraguado entre la barra y la pared del tubo simulador, del cual se colige que la densidad promedio del cementicio es de 2,073 g/cc.

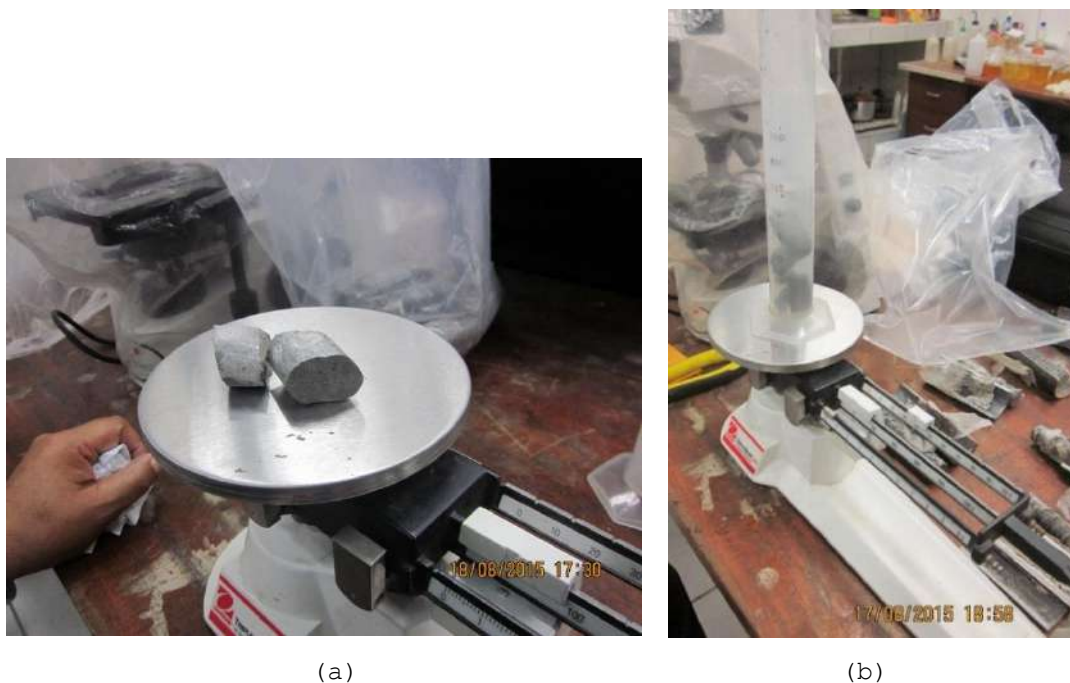


Figura 131. Medición de la Densidad del Cementicio Fraguado. (a) Pesaje de la Probeta Vacía y las Muestras. (b) Pesaje de la Probeta Conteniendo la Muestra y Enrasado con Agua a 110 ml.  
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 26

Densidad del Cementicio Fraguado en Función del Diámetro del Tubo Simulador

Diámetro del tubo simulador (mm)	Densidad del cementicio fraguado (g/cc)
32,50	2,275
36,30	1,926
38,30	1,985
42,00	2,106

Fuente: Elaboración propia.

#### **H) Absorción de agua – hidratación**

Los ensayos para determinar la capacidad de absorción de agua del cementicio fraguado, se llevó a cabo en el laboratorio de Pirometalurgia de la EP Ingeniería Metalúrgica, haciendo los pesajes utilizando la balanza analítica digital Adventur Z OHAUS Máxima carga: 310 g, precisión: 0,001 g, que ilustra la figura 132 (a).

Inicialmente, se pesaron y registraron los pesos de las probetas secas, que ilustra la figura 132 (b), luego en una bandeja con agua se remojaron por un tiempo de 6 horas 5 minutos, siendo la temperatura del agua 22,2 °C. Transcurrido ese tiempo, se extrajeron las

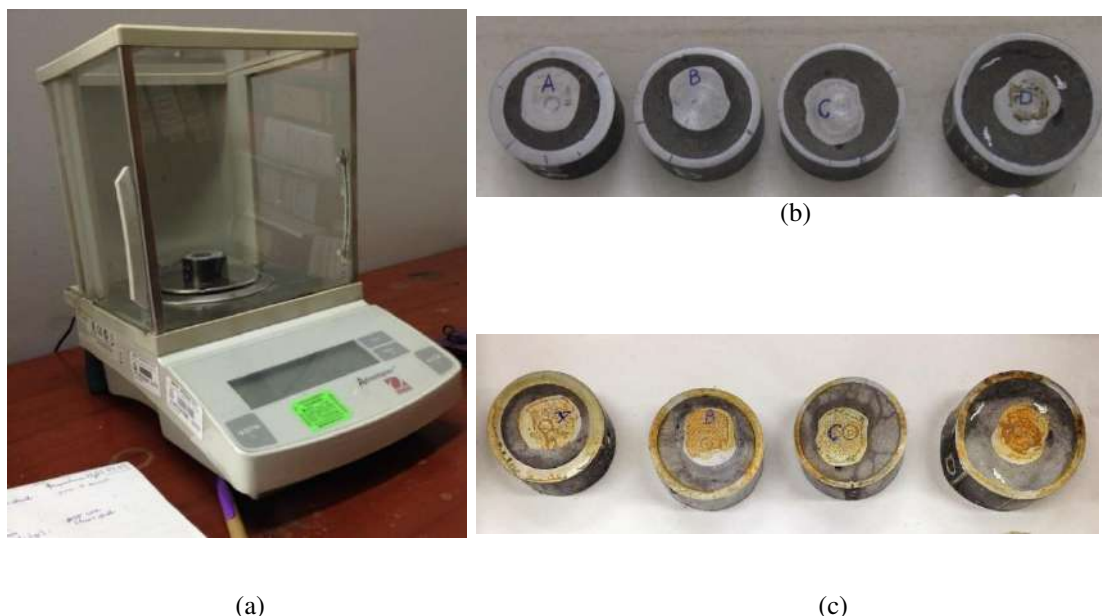
probetas, secando externamente con paños absorbentes, se colocaron en la mufla a 30 °C por espacio de 10 minutos, luego del cual se volvió a pesar las probetas con la misma balanza y en el mismo orden como se procedió antes del remojo, las probetas quedaron como ilustra la figura 132 (c), con la porción de barra helicoidal y las paredes del tubo ligeramente oxidadas. Registrando los respectivos pesos y haciendo los cálculos del porcentaje de agua absorbida se obtuvo la tabla 27, donde se observa que el porcentaje de agua absorbida aumenta con el diámetro, por la mayor masa de cementicio fraguado.

*Tabla 27*

*Absorción de Agua por el Cementicio Fraguado Vs Diámetro de Tubo Simulador*

Diámetro de tubo simulador (mm)	Absorción de agua (%)
32,50	0,24
36,30	0,36
38,30	0,56
42,00	0,45

Fuente: Elaboración propia.



*Figura 132. Proceso para Determinar la Capacidad de Absorción de Agua del Cementicio. (a) Pesaje la Probeta en la Balanza Analítica. (b) Probetas Pesadas en Seco. (c) Probetas Pesadas Después del Remojo y Secado.*

Fuente: Elaboración propia.

**I) Tratamiento térmico.** Este ensayo se realizó en el laboratorio de la FII, para analizar el comportamiento del cementicio al mantenerlo en un ambiente bajo una determinada temperatura, usando para ello el horno mufla ilustrado en la figura 62.

Inicialmente, este ensayo se hizo sobre las probetas mostradas en la figura 132 (b), bajo una temperatura de 100 °C, como parte también del ensayo de rugosidad, como resultado se observó que todas las probetas no sufrieron ninguna alteración.

Posteriormente, se hicieron los ensayos en dos estadíos o temperaturas de 200 °C y 400 °C, para lo cual, fue necesario liberar muestras de cementicio de los cuatro diámetros ensayados, como ilustra la figura 133, donde la muestra correspondiente al diámetro de 36,3 mm (segunda figura de izquierda a derecha), exhibe restos del envoltorio plástico englobado en la masa del cementicio; es de destacar que para otros diámetros no se aprecia dicho envoltorio.



*Figura 133.* Muestras de cementicio liberados del tubo y la barra helicoidal, antes de su tratamiento térmico  
Fuente: Elaboración propia.

El tratamiento térmico a 200 °C de temperatura, se practicó por espacio de 7 horas 38 minutos. A 3 horas y 20 minutos de iniciado este tratamiento, se observó el estado del cementicio dentro de la mufla, sin notar cambios sustanciales, por lo que se prosiguió con el tratamiento. Concluido el tratamiento y extraídas las muestras (después de 7Hr 38'), se observó que las muestras de cementicio no sufrieron cambios sustanciales, en estructura ni coloración. Únicamente, el envoltorio plástico quedó calcinado, como ilustra la figura 134 (segunda figura de izquierda a derecha), que se presenta como manchas negras en su parte inferior.

Luego de tomar los datos pertinentes del ensayo a 200 °C, se volvieron a introducir las muestras nuevamente a la mufla, esta vez a la temperatura de 400 °C y por espacio de 2 horas 1 minuto. Transcurrido dicho tiempo, se observa que el cementicio para este



tratamiento tampoco sufre cambios sustanciales, únicamente se nota un ligero cambio en su coloración al pasar de gris a beige rojizo, como ilustran las figuras 135.



*Figura 134. Estado de las muestras de cementicio después de 7 horas y 38 minutos de tratamiento térmico a 200 °C.*

Fuente: Elaboración propia.



*Figura 135. Estado de las muestras de cementicio, luego del tratamiento térmico a 400 °C*

Fuente: Elaboración propia.

A modo de ejemplo, la Figura 136, presenta los estados de la muestra de cementicio instalado en tubo simulador de 36 mm para los dos estadíos de temperatura. La figura 136 (a), corresponde a la muestra antes de su tratamiento térmico, en su parte inferior se nota residuos de envoltorios plásticos incluido en la masa del cementicio. Las figuras 136 (b) y 136 (c), exhiben la misma muestra después de su sometimiento a las temperaturas de 200 °C y 400 °C, respectivamente. En estas dos últimas figuras se observan que no hay diferencias

sustanciales entre ambas, salvo una tenue diferencia en la coloración, con el envoltorio plástico calcinado.



Figura 136. Estado del Cementicio Instalado en Tubo Simulador de 36 mm Antes y Después del Ensayo Térmico. (a) Muestra Antes de Choque Térmico. (b) Después del Choque Térmico de 200 °C. (c) Después del Choque térmico de 400 °C.

Fuente: Elaboración propia.

## 7.2 Resultados del Estudio de las Barras Helicoidales Instaladas con Cartuchos de Resina

Los Cartuchos de resina usados en el presente estudio, fueron cartuchos de resina Lockset donados por la Cía. Minera Poderosa S.A., fabricados por Minova USA Inc., cuya presentación en cajas de 30 cartuchos ilustra la figura 137 (a). La velocidad de fraguado de los cartuchos de resina usados es medio, que corresponde a 60 s (etiqueta verde, según Minova), con la nomenclatura: 2812M50LIF.

Los cartuchos de resina Lockset, se presentan envasados en bolsas plásticas de 0,05 mm de espesor de una consistencia rígida (casi como un tubo) de 28 mm de diámetro, 300 mm de longitud y 367 g de peso. Por ambos extremos, este sellado con un cierre de aluminio de 4 mm de ancho, ver figura 137 (b). El interior del cartucho tiene dos compartimientos, separados por un diafragma del mismo material plástico y en toda su longitud, como ilustra al lado izquierdo la figura 137 (b), donde el componente oscuro es la resina de poliéster y el componente claro es el catalizador químico. El resultado referente a las capacidades de anclaje y elongaciones se presenta en el Anexo A-5.

De acuerdo al análisis de los ensayos realizados en la EP de Ing. Metalúrgica, estos componentes están en la siguiente proporción porcentual en peso: 67,3 % de resina, 32,0 %

de catalizador y 0,7 % corresponde al envoltorio y diafragma plástico. Asimismo, la densidad de estos componentes se determinó en el mismo laboratorio, arrojando los siguientes resultados: 1,99 g/cc par la resina y 1,74 g/cc para el catalizador.



(a)

(b)

Figura 137. Cartuchos de Resina Lockset de Minova. (a) Presentación en Cajas Mostrando Etiqueta (verde). (b) Mostrando sus Componentes de Resina y Catalizador Separados por un Diafragma.

Fuente: Elaboración propia.

**7.2.1 Capacidad anclaje en función de la LEA.** En esta alternativa de sostenimiento, no se pudo instalar las barras helicoidales de 4 pies de LEA, por la rapidez del fraguado y la limitada capacidad de los equipos utilizados. La tabla 28 y la figura 138 deducidos de los valores presentados como modelo en el Anexo A-5, ilustran la capacidad de anclaje de las Barras Helicoidales instaladas con cartuchos de resina en tubos simuladores en función de la longitud efectiva de anclaje. Se observa que, alcanza la mayor capacidad de anclaje para diámetro de 32,5, seguido por de 42 mm y menor valor en 38,3 mm. Para las LEAs ensayadas, la capacidad de anclaje se muestra ascendente hasta 2 y 2,5 pies, para luego convertirse en asintótica. Por consiguiente, el diámetro óptimo para instalar las barras helicoidales con cartuchos de resina, es 32,5 mm.

Tabla28

*Capacidad de Anclaje de las Barras Helicoidales Instaladas con Cartuchos de Resina en Función de la LEA*

LEA (pies)	Capacidad de anclaje (ton)			
	D. T. Sim. = 33 mm	D. T. Sim. = 33 mm	D. T. Sim. = 38 mm	D. T. Sim. = 42 mm
1	19.85	11.91	9.92	13.89
2	21.25	16.87	11.91	19.35
3	21.00	17.37	10.92	17.86

Fuente: Elaboración propia.

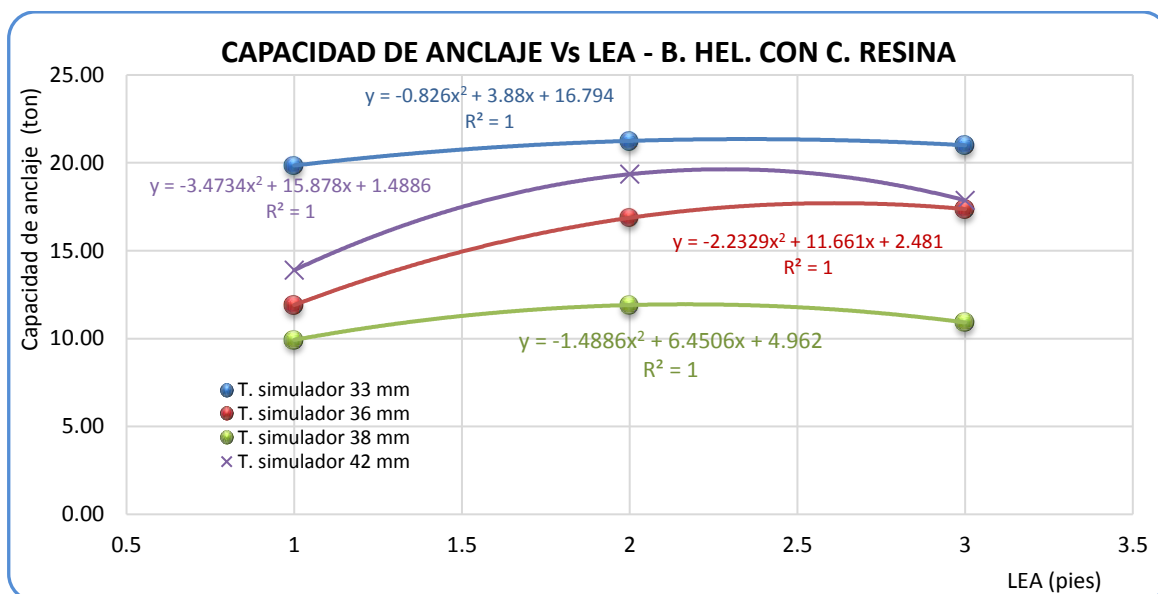


Figura 138. Capacidad de Anclaje de las Barras Helicoidales Instaladas con Cartuchos de Resina en Función de la LEA

Fuente: Elaboración propia.

### 7.2.2 Capacidad de anclaje en función del diámetro del tubo simulador.

El valor promedio de las capacidades de anclaje de las barras helicoidales instaladas con cartuchos de resina en función del diámetro de los tubos simuladores se presenta en la tabla 29 y la figura 139 obtenidos de los valores presentados en tablas similares a los presentados en el Anexo A-5. La mayor capacidad de anclaje se presenta para 3 pies de LEA, cuyo valor es ligeramente superior para 2 pies y el valor más bajo para la LEA de 1 pie.

El comportamiento de la capacidad de anclaje de esta alternativa de sostenimiento, es similar cuando las barras helicoidales se instalan con cartuchos de cementicio, dado que su capacidad de anclaje desciende como aumenta el diámetro del tubo simulador de entre 37 y 38 mm, para luego volver a ascender para diámetros mayores, para todas las LEAs en estudio.

Tabla 29

Capacidad de Anclaje de las Barras Helicoidales con Cartuchos de Resina en Función del Diámetro del Tubo Simulador

Diámetro interior del tubo simulador (mm)	Capacidad de anclaje (ton)		
	LEA = 1 pie	LEA = 2 pies	LEA = 3 pies
32,50	19,85	21,25	21,00
36,30	11,91	16,87	17,37
38,30	9,92	11,91	10,92
42,00	13,89	19,35	17,86

Fuente: Elaboración propia.

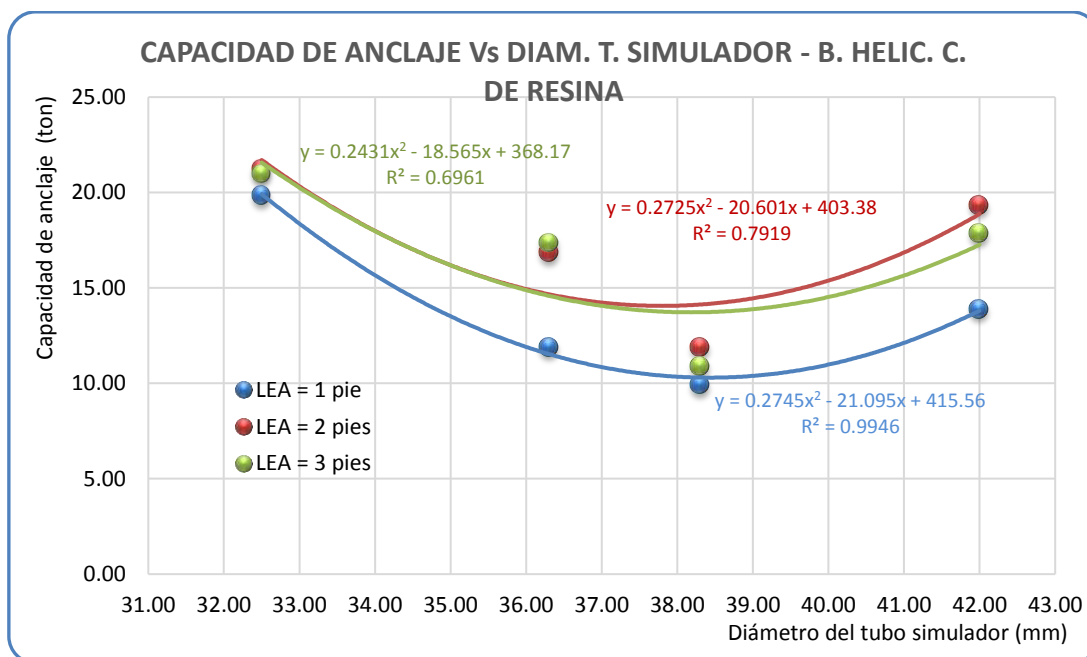


Figura 139. Capacidad de Anclaje de las Barras Helicoidales Instaladas con Cartuchos de Resina en Función del Diámetro de Tubo Simulador.

Fuente: Elaboración propia.

**7.2.3 Elongación en función de la carga aplicada y diámetro del tubo simulador.** Como puede apreciarse en la figura 140, la elongación de las barras helicoidales instalados en tubos simuladores con cartuchos de resina en función de la carga aplicada (ver también el Anexo A-5), se manifiesta con mayor intensidad en tubos simuladores de 38,3 mm, seguido por el 32,5 mm. En tubos simuladores de 36,3 y 42 mm la elongación es menor y muy similares para ambos diámetros; por ejemplo, para 12 ton de carga, se obtuvieron elongaciones de 2,32; 2,12; 3,52 y 1,82 mm para los diámetros de 32,5; 36,3; 38,3 y 42 mm, respectivamente. Cabe destacar que, la elongación guarda una relación lineal con la carga aplicada.

**7.2.4 Propiedades físicas de la resina fraguada dentro de los tubos simuladores.** Para determinar las propiedades de la resina fraguada o curada, como: acoplamiento entre la barra helicoidal y las paredes interiores de los tubos simuladores, posición de la barra, estado y posición del envoltorio plástico, entre otros aspectos; en un principio se ideó hacerlos en base a muestras seccionadas tanto transversal como longitudinalmente, similar a lo indicado para el caso del cementicio (ver como ejemplo el Anexo D-2). Sin embargo, el seccionamiento longitudinal de las muestras de pernos seleccionadas, no pudo llevarse a cabo, salvo en tramos bastante cortos de entre 10 y 12 cm, con los cuales fue posible analizar entre otras propiedades, la porosidad, acoplamiento y



adherencia. Cabe reiterar, que el seccionamiento de las muestras se llevó a cabo en la EAP de Ingeniería de Minas de la UNMSM, taller metal mecánico y la FII de la UNMSM.

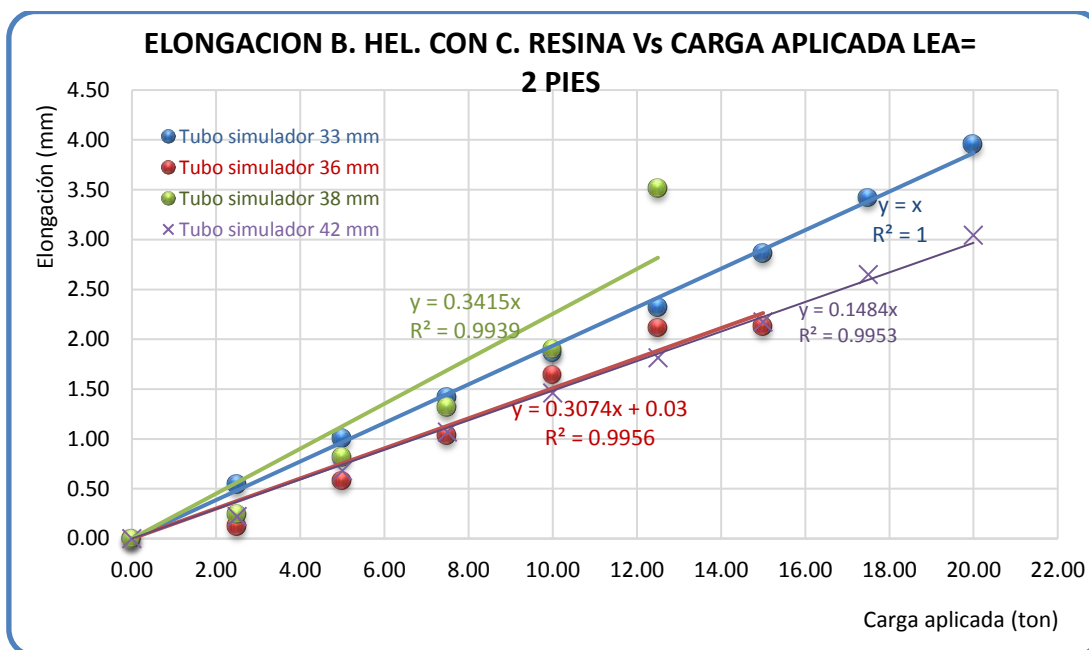


Figura 140. Elongación de la Barra Helicoidal Instalada con Cartuchos de Resina

Fuente: Elaboración propia.

Las propiedades macroscópicas que se presentan en el anexo D, se determinaron de las muestras seccionadas, por observación y medición directa; mientras que las propiedades como: rugosidad, dureza, porosidad, ultrasonido, adherencia, etc. se determinaron en el laboratorio de Máquinas y Herramientas de la FII, parte de cuyo informe se presenta en el Anexo E. Los ensayos correspondientes para determinar la densidad, absorción de agua, etc., se llevaron a cabo en la Escuela de Ing. Metalúrgica de la UNMSM.

**A) Seccionamiento de muestras.** Para todas las muestras seleccionadas para este propósito, antes de proceder con su seccionamiento, en cada futuro segmento se marcaron adecuadamente y en forma reiterativa, el código original y el número de sección empezando por 0 en la cabeza del perno y 4 o 5 en la cola del perno, como ilustra la figura 141, que corresponde a la muestra 3 de la barra helicoidal instalada con cartuchos de resina en tubo simulador de 42 mm, siendo la longitud efectiva de anclaje de 3 pies y número de muestra 3 (código BHCR-40-3'-3). El corte de las 5 o 6 secciones, se hizo con la misma cortadora de metales utilizado para el caso de las barras helicoidales instaladas con cementicio. Para prevenir que el calor generado por el corte, altere las propiedades de la resina y el envoltorio plástico, durante el seccionamiento se aplicó agua fría hasta su completo trozado.



Figura 141. Muestras Marcadas para el Seccionamiento de las Barras Helicoidales Instaladas con Cartuchos de Resina.

Fuente: Elaboración propia.

Las muestras se seleccionaron tomando como base el diámetro de los tubos simuladores (32,5; 36,3; 38,3 y 42 mm); las muestras seccionadas transversalmente que ilustra la figura 142 (a), permitieron hacer un análisis macroscópica de las propiedades de la resina, entre ellos la porosidad, rugosidad, Posición de la barra helicoidal respecto al eje del tubo simulador, dureza con la escala de Mohs, presencia del envoltorio plástico, y, acoplamiento de la resina en la barra helicoidal y pared interior del tubo simulador. Para el análisis instrumental, fue necesario preparar probetas como se detalla más adelante y para el tratamiento térmico se liberaron muestras de resina por cada diámetro ensayado.

El seccionamiento longitudinal que ilustra la figura 142 (b), se llevó a cabo con la finalidad de analizar la presencia del envoltorio plástico, la porosidad del cementicio, adherencia de la resina en la barra y la pared del tubo simulador. Adicionalmente, se realizaron las pruebas de tratamiento térmico y determinación de la densidad. Cabe destacar que, el seccionamiento longitudinal se hizo únicamente del tubo y la resina en este caso, es decir, sin afectar a la barra helicoidal propiamente, por la dificultad de corte.



(a)



(b)

Figura 142. Seccionamiento de Muestras de Barras Helicoidales Instaladas con Cartuchos de Resina. (a) Seccionamiento Transversal. (b) Seccionamiento Longitudinal.

Fuente: Elaboración propia.



**B) Preparación de probetas.** La medición instrumental de las propiedades físicas de la resina, al igual que para el caso anterior, se llevó a cabo en el Laboratorio de Máquinas y Herramientas de la FII, que a su vez ordenó la preparación de las probetas necesarias en el taller metal mecánico. La figura 143, ejemplifica la preparación de las probetas de las barras helicoidales, donde la figura 143 (a), ilustra el proceso de corte de la barra helicoidal instalada con cartuchos de resina en tubo simulador de 36,3 mm (código original BHCR-36-3-1), mientras que la figura 143 (b), exhibe la probeta terminada (F). La figura 144, presenta las probetas preparadas para los 4 diámetros ensayados, después de pulido los cortes en la FII. Los códigos E, F, G y H, fueron consignados en dicho laboratorio, en remplazo de los códigos originales: BHCR-33-3-1, BHCR-36-3-1, BHCR-38-2-2 y BHCR-40-3-3, respectivamente.



(a)



(b)

*Figura 143. Modelo de Preparación de Probetas de Barras Helicoidales Instaladas con Cartuchos de Resina en Tubo Simulador de 36 mm. (a) Proceso de Corte. (b) Probeta Lista para las Pruebas.*

Fuente: Elaboración propia.



*Figura 144. Probetas de Barras Helicoidales Instaladas con Cartuchos de Resina en Diferentes Tubos Simuladores*

Fuente: Elaboración propia.

**C) Pruebas sobre la resina fraguada entre la barra y la pared interior de los tubos simuladores.**

i) *Posición de la barra helicoidal dentro del tubo simulador.* Este análisis se llevó a cabo en las muestras seccionadas, cuyo modelo se presenta en la figura 145, en base a las cuales, se proyectó la posición de la barra helicoidal a lo largo del tubo simulador, definiendo propiamente las siguientes posiciones:

- Centrado: Cuando el eje del perno coincide con el eje del tubo simulador.
- Ligeramente descentrado: Cuando la barra se presenta posicionado cerca al eje del tubo, un ejemplo de esta posición es la que ilustra la figura 145 en su inferior izquierdo (CR 38).
- Descentrado: la barra se presenta cerca a la pared interior del tubo simulador, como ilustra la figura anterior en su superior derecho (CR 36).
- Muy descentrado: Cuando la posición del perno está muy cerca o pegado a pared interior del tubo simulador, un ejemplo de ello es la que ilustra la figura anterior en su inferior derecho (CR 40).



*Figura 145. Posición de las Barras Helicoidales Instaladas con Cartuchos de Resina.*  
Fuente: Elaboración propia.

En la mayoría de los casos, la posición de la barra helicoidal dentro del tubo simulador se presenta entre descentrado y muy descentrado, no obstante que la instalación de todas las muestras se llevaron a cabo en posición vertical. En algunos segmentos de muestras, se observa que la barra helicoidal se presenta centrado, siendo esto únicamente por coincidencia de corte. Más detalles al respecto se encuentra en el anexo D-2.

ii) *Porosidad.* Los poros en las resinas son bastante pequeñas y en muchos casos el envoltorio plástico contribuye a la formación de burbujas. En general el tamaño de los poros visibles con lupa, van de 0,5 a 2 mm. Como se ha citado en el capítulo anterior, la porosidad se genera por el aire atrapado durante la instalación de las barras helicoidales y se distribuyen en la masa de la resina por el batido.

Como puede observarse en las figuras 146, el número de poros es mayor en diámetros mayores que en los pequeños, tal es así que, en tubo simulador de 32,5; 36,3 y 42 mm se contabilizan respectivamente 7; 20 y 28 poros. Asimismo, en las figuras 149 (b) y 150 (b), que corresponden a los diámetros de 38,3 y 42 mm en corte longitudinal, se puede observar que la porosidad se manifiesta con mayor intensidad en las paredes interiores de los tubos simuladores.

iii) *Acoplamiento y adherencia.* En los cortes transversales de las muestras, se observa que el acoplamiento de la resina tanto en la barra como en la pared interior de los tubos simuladores, es bueno, independiente del diámetro del tubo simulador. Asimismo, para observar el acoplamiento de la resina a lo largo del tubo simulador, se hizo cortes longitudinales a segmentos de muestra de 10 a 12 cm de longitud tal como se ha ilustrado en la figura 142 (b), a fin que posibilite observar la facilidad de su desprendimiento tanto de la barra como de la pared interior de los tubos simuladores, casos que ilustran las figuras 147, 148, 149 y 150, para los respectivos diámetros de tubos simuladores de 32,5; 36,3; 38,3 y 42 mm.

La adherencia de la resina en la barra helicoidal, es mayor que en la pared interior de los tubos simuladores, puesto que al tratar de desprenderla ofrece más resistencia, como prueba de ello se observan restos de resina adheridos en sus roscas, como ilustran las figuras 147 (a), 148 (a), 149 (a) y 150 (a), para 32,5; 36,3; 38,3 y 42 mm de diámetro, respectivamente.

En cambio, en las paredes de los tubos simuladores, se observa que, la resina muestra menos adherencia. Por cuya razón, se desprende con suma facilidad, dejando la pared interior de los tubos simuladores limpio, como ilustran las figuras 148 (b), 149 (b) y 150 (b), para los respectivos diámetros de 36,3; 38,3 y 42 mm. Sin embargo, para 32,5 mm de diámetro se observa mayor adherencia, por cuya razón, se observa restos de resina en la pared interior de dicho tubo, como ilustra la figura 147 (b).

La adherencia de la resina tanto en la propia barra como en la pared interior del tubo simulador, además de la edad de los cartuchos de resina, velocidad de rotación, tiempo de batido, entre otros, se ve afectada por los siguientes factores:

a) El envoltorio plástico de los cartuchos, que en unos casos queda enroscado alrededor de la barra helicoidal, como ilustran las figuras 148 (a), 149 (a) y 150 (a). En otros, queda pegado en la pared del tubo simulador impidiendo que la resina se adhiera a dicha superficie, como ilustran las figuras 147 (b) y 151.



*Figura 146. Porosidad de la Resina Fraguado en Distintos Diámetros de Tubos Simuladores en Corte Transversal. (a) Diámetro 32,5 mm. (b) Diámetro 36,3 mm. (c) Diámetro 38,3 mm. (d) Diámetro 42 mm. Fuente: Elaboración propia.*



*Figura 147. Acoplamiento y Adherencia de la Resina en Tubo Simulador de 32,5 mm. (a) En la Barra Helicoidal. (b) En la Pared del Tubo Simulador. Fuente: Elaboración propia.*



(a) (b)  
 Figura 148. Acoplamiento y Adherencia de la Resina en Tubo Simulador de 36,3 mm. (a) En la Barra Helicoidal. (b) en la Pared del Tubo Simulador.  
 Fuente: Elaboración propia.



(a) (b)  
 Figura 149. Acoplamiento y Adherencia de la Resina en Tubo Simulador de 38,3 mm. (a) En la Barra Helicoidal. (b) En la Pared del Tubo Simulador.  
 Fuente: Elaboración propia.

b) la presencia de óxido en la superficie de la barra y la pared del tubo simulador. La pátina de óxido actúa como una película repelente, impidiendo la adherencia de la resina, como ilustran las figuras 147 (b) y 149 (b), donde se aprecia que la pátina de óxido de hierro ha impedido que la resina se adhiera adecuadamente a la pared del tubo, además de la porosidad.

c) Porosidad ocasionada por el aire atrapado durante la instalación de las barras helicoidales, siendo más notorio en diámetros mayores que en pequeños. Como puede apreciarse en las figuras 148 (b), 149 (b) y 150 (b), la resina se nota porosa, impidiendo su adherencia en la pared del tubo simulador, por lo que se han desprendido con suma facilidad.

d) La combinación de los factores anteriores, afectará aún más seriamente la adherencia de la resina, entre éstas, la combinación de óxido y porosidad como es el caso que ilustra la figura 151.





(a)

(b)

*Figura 150. Acoplamiento y Adherencia de la Resina en Tubo Simulador de 42 mm. (a) En la Barra Helicoidal. (b) En la Pared del Tubo Simulador.*

Fuente: Elaboración propia.



*Figura 151. Presencia de envoltorio plástico y óxido evitan la adherencia de la resina.*

Fuente: Elaboración propia.

Al margen de las condiciones en que se encontraban instaladas las barras helicoidales con cartuchos de resina dentro de los tubos simuladores, se llevaron a cabo las pruebas Charpy en la FII, como ilustra la figura 152, que corresponde al preciso instante que el péndulo impacta a la probeta correspondiente a la muestra de barra helicoidal instalada con cartuchos de resina en tubo simulador de 38,3 mm (código BHCR-38-2-2).

Cada probeta fue sometida a 3 niveles de impacto, dejando caer el péndulo de 50°, 60° y 70°. En cada impacto, la muestra fue observada y registrado su estado, entre otros: su

fisuramiento, desplazamiento tanto de la barra como de la resina en el contacto con la pared del tubo simulador, descostramiento, etc. En caso de las probetas correspondiente a diámetros de tubos simuladores de 32,5 y 38,3 mm, para los 3 niveles de impacto del péndulo Charpy, no sufrieron ningún daño ni alteración visibles, solamente quedaron las marcas dejadas por la masa pendular en la zona de impacto contra la barra helicoidal.



*Figura 152. Péndulo Charpy Impactando a la Probeta.*  
Fuente: Elaboración propia.

El ensayo Charpy sobre la muestra de barra helicoidal instalada en tubo simulador de 36,3 mm de diámetro (código BHCR-36-3-1), tuvo los siguientes efectos: Para 50° de ángulo de caída, la barra junto con la resina sufrió un ligero desplazamiento de 0,5 mm, a lo largo de la pared interior del tubo simulador, notándose el mismo desplazamiento por ambas caras de la probeta, la figura 153 (a) ilustra dicho estado por la cara de impacto. Cuando el péndulo se dejó caer de 60°, siguió desplazándose todo el conjunto (barra – resina) dentro del tubo simulador como puede observarse en la figura 153 (b), que corresponde a la cara de impacto, también se puede apreciar un pequeño descostramiento de la resina pegado a la pared del tubo simulador. Finalmente, cuando se dejó caer el péndulo de un ángulo de 70°, la resina con la barra incluida, sufrió un desplazamiento acumulativo de 3 mm como puede apreciarse en la figura 153 (c), que corresponde a la probeta observada por la cara opuesta a la de impacto.



En caso de la probeta correspondiente a la barra helicoidal instalada con cartuchos de resina en tubo simulador de 42 mm, sometido a la prueba de Charpy, se tuvo los resultados que a continuación se detallan:

La figura 154 (a), muestra la probeta antes de someterse a la prueba de charpy. La figura 154 (b), corresponde a la probeta después de la prueba de charpy donde el ángulo de caída fue de  $50^\circ$ , el resultado del impacto no causó daños visibles a la probeta en la cara del impacto como ilustra la figura 154 (c), pero por la cara opuesta de la probeta, se produjo un ligero fisuramiento casi diametral contorneando a la barra helicoidal.



(a)

(b)

(c)

Figura 153. Estado de la Resina en Tubo Simulador de 36,3 mm Después de las Pruebas de Charpy. (a) Angulo de Caída de  $50^\circ$ . (b) Angulo de Caída de  $60^\circ$ . (c) Angulo de Caída de  $70^\circ$ .

Fuente: Elaboración propia.

Cuando el péndulo se dejó caer con un ángulo de  $60^\circ$  que ilustra la figura 154 (c), en la cara de impacto se notó un ligero desplazamiento de la barra helicoidal; mientras que, por la cara opuesta de la probeta, la fisura anterior se ensanchó y se produjo descostramientos de la resina pegada a la pared del tubo simulador.

Para la caída con ángulo de  $70^\circ$ , por la cara de impacto se nota un desplazamiento de 5,5 mm de la barra helicoidal con una porción de resina, hacia la posición descentrada de la barra, la cara opuesta evidencia el desplazamiento de casi el 25 % de resina junto con la barra como puede apreciarse en la figura 154 (d). Cabe destacar que, por la cara de impacto solo se nota el desplazamiento de la barra, más no de la resina. Este desplazamiento ha sido favorecido por la presencia del envoltorio plástico.

iv) *Presencia del envoltorio plástico de los cartuchos.* El envoltorio plástico y diafragma del cartucho de resina, queda englobado en la masa de la resina en distintas posiciones por la percusión y rotación de la barra helicoidal dentro de los cartuchos de resina para mezclar sus componentes; con tendencia a acumularse en el fondo del tubo simulador,

como muestran las bases de los tubos simuladores de 32,5 y 42 mm ilustradas en las figuras 155 (a) y 155 (b), respectivamente. En ambos casos, se observa que el envoltorio se ha acumulado en el fondo del tubo simulador y pegado a sus paredes, litando el acoplamiento y adherencia de la resina; también en ambas figuras se observa que el sello de aluminio sigue intacto.



*Figura 154. Estados de la Resina por la Acción del Péndulo Charpy. (a) Antes del Ensayo. (b) Caída de 50°. (c) Caída de 60°. (d) Caída de 70°.*  
Fuente: Elaboración propia.

Otra posición que adquieren los envoltorios, es que se enroscan en las barras helicoidales como puede apreciarse en la figura 156, esta configuración evita que la resina se adhiera en las barras helicoidales, reduciendo su capacidad de anclaje. Como se ha indicado en el párrafo anterior, otra posición negativa del envoltorio plástico es cuando se acopla en la pared de los tubos simuladores (taladros), impidiendo que la resina se acople y

adhiera en la misma, como ilustra la figura 157, configuración que afecta la capacidad de anclaje de dichos pernos.



(a)



(b)

*Figura 155. Acumulación de los Envoltorios Plásticos de los Cartuchos de Resina en el Fondo de los Tubos Simuladores. (a) Tubo de 32,5 mm. (b) Tubo de 42 mm.*

Fuente: Elaboración propia.



*Figura 156. Envoltorio Plástico del Cartucho de Resina, Envolviendo a la Barra Helicoidal Evitando su Acoplamiento y Adherencia.*

Fuente: Elaboración propia.

Cabe reiterar que los cartuchos de resina antes de ser introducidos dentro de los tubos simuladores, fueron rasgados longitudinalmente en 4 posiciones diametralmente opuestos, con la idea de facilitar el mezclado de sus componentes y sobre todo su acoplamiento tanto en las barras como en las paredes de los tubos simuladores. Al igual que en el caso de los cartuchos de cementicio, por la rapidez que demandan las operaciones, durante la instalación de estos pernos, los cartuchos de resina se introducen dentro de los taladros, tal cual se presentan como producto, es decir, sin rasgar su envoltorio.



*Figura 157. Envoltorio Plástico del Cartucho de Resina Evitando su Acoplamiento y Adherencia en la Pared Interior del Tubo Simulador.*

Fuente: Elaboración propia.

Las figuras 158, presentan como muestra, las posiciones del envoltorio plástico vistos en corte transversal, para los 4 diámetros de tubos simuladores utilizados en el estudio. En caso del tubo simulador de 32,5 mm se colocaron 1 cartucho por pie de tubo, cuyos envoltorios se ha posicionado en gran parte de la masa de resina y totalmente plegados, como puede apreciarse en la figura 158 (a), dentro de las líneas rojas.

En tubos simuladores de 36,3 mm, donde se colocaron 1  $\frac{1}{4}$  cartuchos por pie de tubo, se observa mayor presencia del envoltorio plástico como puede corroborarse en la figura 158 (b) (áreas encerradas con líneas rojas), donde la mayor parte del anillo de resina (entre la barra y la pared del tubo simulador) ha englobado dicho envoltorio completamente plegados, en desmedro de la capacidad de anclaje de las barras helicoidales.

Únicamente por la posición de corte, en la figura 158 (c), se observa escasa presencia del envoltorio plástico, para la muestra de las barras helicoidales instalados con resina en tubo simulador de 38,3 mm, habiéndose colocado 1  $\frac{1}{2}$  cartuchos por pie de tubo simulador.

Finalmente, para el caso de las barras helicoidales instaladas con cartuchos de resina en tubos simuladores de 42 mm, donde se colocaron 1  $\frac{3}{4}$  de cartuchos por pie, los envoltorios plásticos (áreas dentro de la línea roja) se han posesionado a un lado del anillo de resina, como muestra la figura 158 (d).



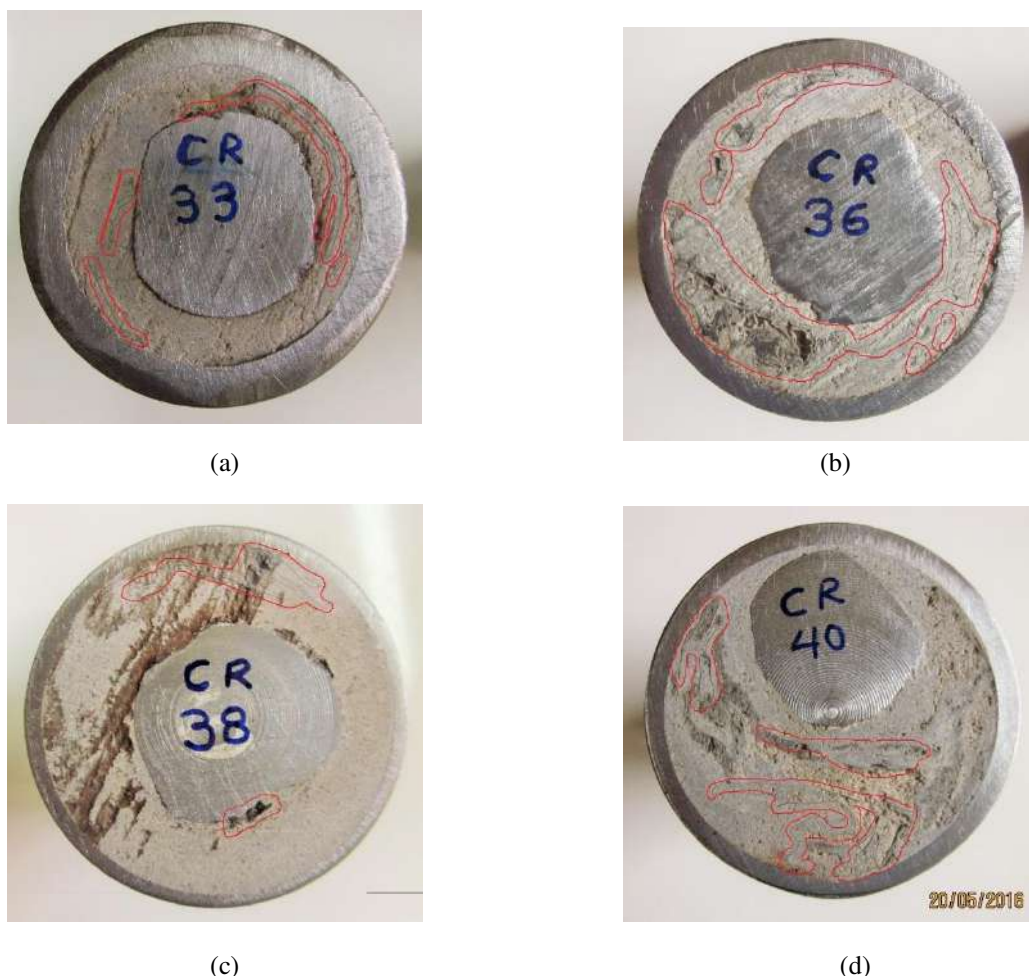


Figura 158. Presencia del Envoltorio Plástico de los Cartuchos de Resina en Sección Transversal. (a) Diámetro 32,5 mm. (b) Diámetro 36,3 mm. (c) Diámetro 38,3 mm. (d) Diámetro 42,0 mm

Fuente: Elaboración propia.

v) *Aspereza / rugosidad.* Sobre cortes de los segmentos seccionados, antes de pulirlos con lijas finas, se hizo una apreciación de la aspereza al tacto, determinándose para todos los casos que, las superficies de corte son lisas al tacto. Al igual que para los otros casos, la medición instrumental se llevó a cabo en el Laboratorio de FII, sobre las probetas acondicionadas. Análogo al caso de las barras helicoidales instalados con cartuchos de cementicio, las mediciones se llevaron a cabo en dos estados, primero antes de someter a las muestras al choque térmico de 200 °C de temperatura y segundo después del tratamiento térmico. En ambos casos, las mediciones se hicieron en cuatro posiciones, dos cerca de la barra helicoidal y otros dos cerca de la pared interior de los tubos simuladores. Los promedios de las mediciones antes y después del choque térmico, son 1,921  $\mu\text{m}$  y 1,829  $\mu\text{m}$ , respectivamente, estos resultados indican que, al someter las muestras de resina a 200 °C, su rugosidad disminuye ligeramente.

vi) *Dureza.* Haciendo uso de la escala de Mohs, se ensayó rayar las probetas de resina con cristales de calcita (3), fluorita (4), apatito (5) y ortosa (6); observándose que los cristales hasta la calcita no rayan la resina, pero sí la fluorita. Por consiguiente, según esta escala, la dureza de la resina fraguada sería 4. La medición de la dureza se llevó a cabo con el mismo durómetro que para el caso de las barras helicoidales instaladas con cartuchos de cementicio, que ilustra la figura 159.

La medición de la dureza de la resina, se llevó a cabo en ambas bases de la probeta y para cada caso, en 4 posiciones, dos cerca de la pared del tubo y dos próximos a la barra helicoidal, con cuyos valores se han obtenido los promedios parciales y totales como presenta la tabla 30. Con esos resultados se obtiene que la dureza promedio global sería 313,2 HL.

Tabla 30  
Dureza HL de la Resina Fraguada

Diámetro (mm)	Dureza de la resina (HL)		
	Base superior	Base inferior	Promedio
32,5	290,5	311,5	301,0
36,3	316,8	325,3	321,0
38,3	336,5	280,0	308,3
42,0	300,3	345,0	322,6

Fuente: Elaboración propia.

vii) *Densidad de la resina fraguada.* Para determinar esta propiedad, primero fue necesario liberar el anillo de resina fraguada entre la barra helicoidal y la pared interior de los tubos simuladores en estudio. Por cuyo requerimiento, a las muestras seccionadas transversalmente en longitudes de 10 a 12 cm se seccionaron longitudinalmente las paredes del tubo simulador y la resina fraguada hasta la barra helicoidal en 4 posiciones en el taller metal mecánico. La figura 160, ilustra las porciones de resina ya liberados de los tubos simuladores y su pesaje en la balanza analítica.

Como en el caso de la barra helicoidal instalada con cartuchos de cementicio, los pesajes de las resinas fraguadas se llevaron a cabo en laboratorio de la EAP de Ingeniería Metalúrgica cuyo proceso ilustra en la figura 160. Para cada diámetro ensayado, siguió los siguientes pasos: a) Peso de la probeta vacía, b) Peso de la muestra, c) Peso de la probeta con la muestra en su interior, d) Enrasado de agua dentro de la probeta que contiene la muestra hasta 110 cc, e) Peso de la probeta conteniendo la muestra y agua.



*Figura 159. Ensayos de dureza de la resina en el laboratorio de máquinas y herramientas de la FII.*  
Fuente: Elaboración propia.

La tabla 31, presenta la densidad de la resina fraguada entre la barra y la pared del tubo simulador, del cual se obtiene una densidad promedio de 1,956 g/cc. Como puede observarse en esta tabla, la resina fraguada muestra mayor densidad para el diámetro de tubo simulador de 32,5 mm y la menor para 42 mm, es decir, a medida que aumenta el diámetro del tubo simulador, disminuye la densidad.



*Figura 160. Pesajes para determinar la densidad de la resina fraguada.*  
Fuente: Elaboración propia.



Tabla31

*Densidad de la Resina Fraguada en Función de Diámetro del Tubo Simulador*

Diámetro del tubo simulador (mm)	Densidad de la resina fraguada (g/cc)
32,50	2,060
36,30	2,043
38,30	1,945
42,00	1,775

Fuente: Elaboración propia.

viii) *Absorción de agua – hidratación.* Para determinar la capacidad de absorción de agua por la resina fraguada, se tuvieron que realizar los pesajes antes y después del remojo de las probetas en agua, en el laboratorio de piro metalurgia de la EAP Ingeniería Metalúrgica. Inicialmente, se pesaron y registraron los pesos de las probetas secas, que ilustra la figura 161 (a), luego en una bandeja con agua se remojaron por un tiempo de 6 horas 5 minutos, siendo la temperatura del agua 22,2 °C. Luego de rescatar las probetas se secaron externamente con paños absorbentes y se colocaron en la mufla a 30 °C por espacio de 10 minutos. Secadas las muestras, se volvieron a pesar las probetas con la misma balanza y en el mismo orden como se procedió antes del remojo que ilustra la figura 161 (b). Registrando los respectivos pesos y haciendo los cálculos del porcentaje de agua absorbida se obtuvo la tabla 32, de donde se obtiene la capacidad promedio de absorción de agua de 0,15 %, respecto al peso total de la probeta que incluye además del propio peso de la resina, los pesos de la barra y el tubo simulador.

Tabla32

*Absorción de Agua por la Resina Fraguada Vs Diámetro del Tubo Simulador*

Diámetro de tubo (mm)	Absorción de agua por la resina (%)
32,50	0,17
36,30	0,04
38,30	0,15
42,00	0,26

Fuente: Elaboración propia.

ix) *Tratamiento térmico.* Este ensayo se realizó en el laboratorio de la FII, para analizar el comportamiento de la resina al ser sometido a temperaturas de 100 °C, 200 °C y 400 °C. Inicialmente, este ensayo se hizo sobre las probetas mostradas en la figura 161, bajo una temperatura de 100 °C, como parte también del ensayo de rugosidad. El resultado de esta prueba fue que ninguna de las probetas sufrió cambios visibles. Posteriormente, se hicieron los ensayos a las temperaturas de 200 °C y 400 °C, sobre las muestras de resina liberadas anteriormente para los cuatro diámetros ensayados. La figura 162, ilustra las muestras de resina antes de su tratamiento térmico, donde las figuras de izquierda a derecha

corresponden a los tubos simuladores de 32,5 mm; 36,3 mm; 38,3 mm y 42 mm, se observa la presencia de envoltorio plástico.



(a)



(b)

*Figura 161. Probetas para Determinar la Capacidad de Absorción de Agua por la Resina. (a) Probetas Antes del Remojo en agua. (b) Probetas Después del Remojo.*

Fuente: Elaboración propia.

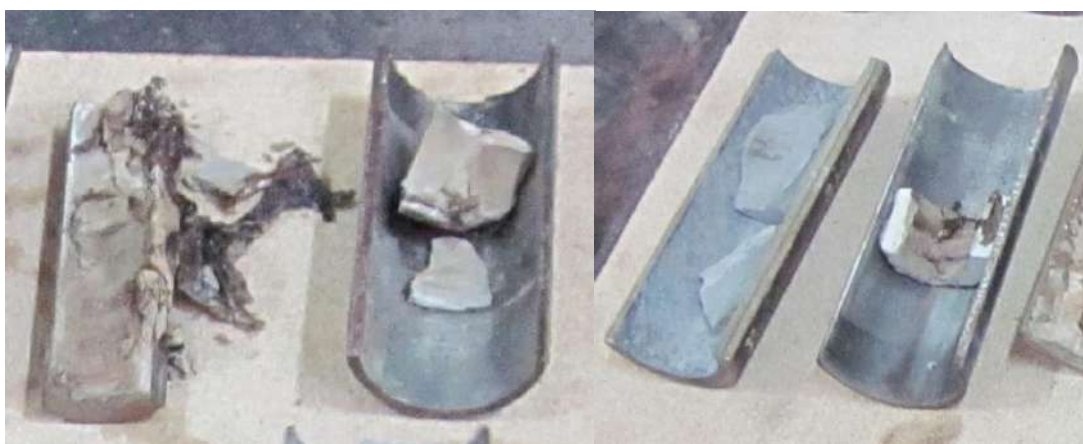


*Figura 162. Muestras de Resina Liberados del Tubo Simulador y la Barra Helicoidal Antes de su Tratamiento Térmico.*

Fuente: Elaboración propia.

El tratamiento térmico a 200 °C de temperatura, al igual que en el caso anterior, se prolongó por 7 horas 38 minutos. Concluido el tratamiento y extraídas las muestras, se aprecia que las muestras de resina no sufrieron cambios visibles, salvo el envoltorio plástico que quedó calcinado, como ilustra la figura 163, donde se observan los envoltorios calcinados como manchas negras.

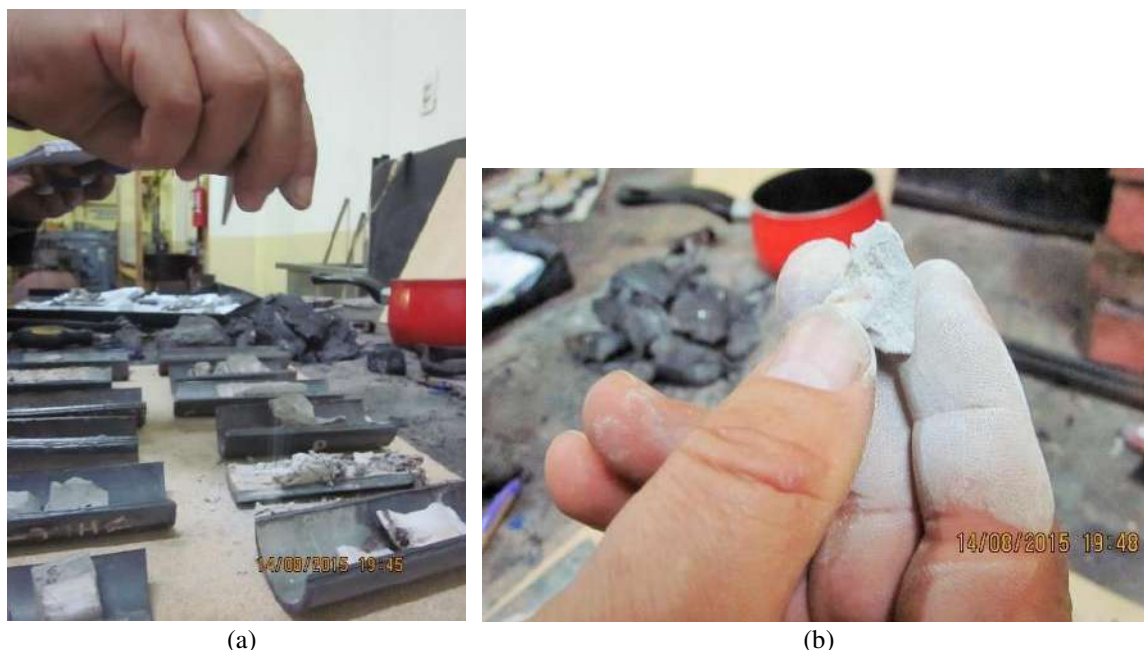
Observado y registrado los datos correspondientes al tratamiento térmico a 200 °C, se volvieron a introducir las muestras a la mufla, esta vez a la temperatura de 400 °C y por espacio de 2 horas 1 minuto. Como resultado de este ensayo se tiene que la resina queda completamente calcinada, tomando una coloración blanquecina como puede apreciarse en la figura 164 y tiene la consistencia de ceniza, fácilmente disgregable con los dedos de la mano, como ilustra las figuras 165 (a) y 165 (b). La resina pierde por completo sus propiedades físicas y químicas al someterse a tratamiento térmico a 400 °C.



*Figura 163. Estado de las Muestras de Resina Después del Tratamiento Térmico a 200 °C.*  
Fuente: Elaboración propia.



*Figura 164. Estado de las Muestras de Resina Después del Tratamiento Térmico a 400 °C.*  
Fuente: Elaboración propia.



(a) (b)  
 Figura 165. Estado de la Resina Después de su Tratamiento Térmico a 400 °C. (a) Se Disgrega con Suma Facilidad. (b) Convertido en Ceniza Mancha los Dedos con Facilidad.  
 Fuente: Elaboración propia.

### 7.3 Resultados de las Pruebas con Barras Helicoidales Instaladas con Lechada de Cemento

El cemento portland, es un cemento hidráulico producido mediante la pulverización del clinker, compuesto esencialmente de silicatos de calcio hidráulicos y que contiene generalmente una o más formas de sulfato de calcio como una adición durante la molienda. Los cementos portland se fabrican en 5 tipos, en el presente estudio se ha utilizado el tipo I.

El cemento portland tipo I, es el cemento portland normal de uso general destinado a las obras de concreto en general como edificaciones, estructuras industriales, reforzamiento y revestimiento de excavaciones. Se caracteriza porque libera más calor de hidratación que otros tipos de cemento. La figura 166, ilustra a la barra helicoidal instalado con lechada de cemento andino portland tipo I.

**7.3.1 Capacidad de anclaje en función de la LEA.** Las Barras Helicoidales instaladas con lechada de cemento, muestran mayor capacidad de anclaje en tubos simuladores de 32,5 mm, seguido por el de 42 mm y el valor más bajo corresponde al diámetro de 38,3 mm, secundado por el de 36,3 mm; como puede corroborarse en la tabla 33 y la figura 167, deducidos a partir de los resultados presentados en el Anexo A-6. Para



32,5 mm, muestra capacidad de anclaje ascendente hasta 3 pies de LEA, luego de la cual, se torna asintótica, lo cual quiere decir que utilizar LEAs superiores a 3 pies es innecesario.



Figura 166. Barra Helicoidal Instalada con Lechada de Cemento Portland Tipo I.  
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 33

Capacidad de Anclaje de las Barras Helicoidales Instaladas con Lechada de Cemento Vs LEA

LEA (pies)	Capacidad de anclaje (ton)			
	Diam. T. Sim. = 33 mm	Diam. T. Sim. = 33 mm	Diam. T. Sim. = 38 mm	Diam. T. Sim. = 42 mm
1	17.37	7.19	5.62	2.98
2	22.17	7.94	7.94	7.94
3	22.00	11.25	7.94	17.37
4	21.33	11.66	11.08	19.85

Fuente: Elaboración propia.

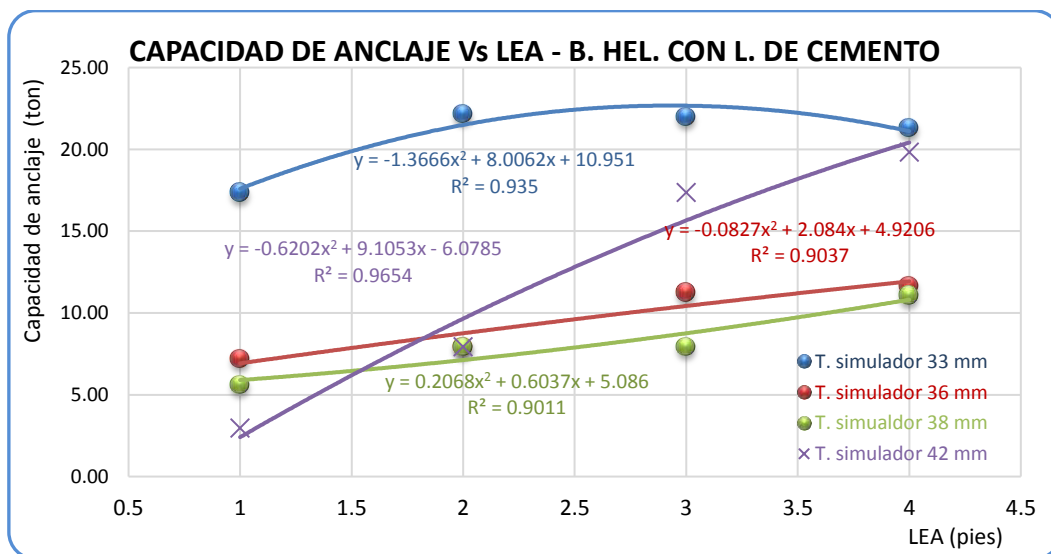


Figura 167. Capacidad de Anclaje de las Barras Helicoidales Instaladas con Lechada de Cemento en Función de la LEA

Fuente: Elaboración propia.

**7.3.2 Capacidad de anclaje en función del diámetro del tubo simulador.** Como puede observarse en la tabla 34 y la figura 168 (ver los valores detallados como modelo en el Anexo A-6), para todas las LEAs ensayadas la capacidad de anclaje de las barras helicoidales instaladas con lecha de cemento en función del diámetro de los tubos simuladores, los mayores valores corresponden al diámetro de 32,5 mm, descendiendo hasta los diámetros entre 37 y 39 mm, volviendo ascender ligeramente para diámetros superiores. Asimismo, su capacidad de anclaje varía directamente con la LEA para todos los diámetros analizados. Por consiguiente, a mayor LEA mayor capacidad de anclaje.

Tabla 34

Capacidad de Anclaje de las Barras Helicoidales Instaladas en Lechada de Cemento en Función del Diámetro de Tubo Simulador

Diámetro interior del tubo simulador (mm)	Capacidad de anclaje (ton)			
	LEA = 1 pie	LEA = 2 pies	LEA = 3 pies	LEA = 4 pies
32,50	17,37	22,17	22,00	21,33
36,30	7,19	7,94	11,25	11,66
38,30	5,62	7,94	7,94	17,37
42,00	2,98	7,94	17,37	19,85

Fuente: Elaboración propia.

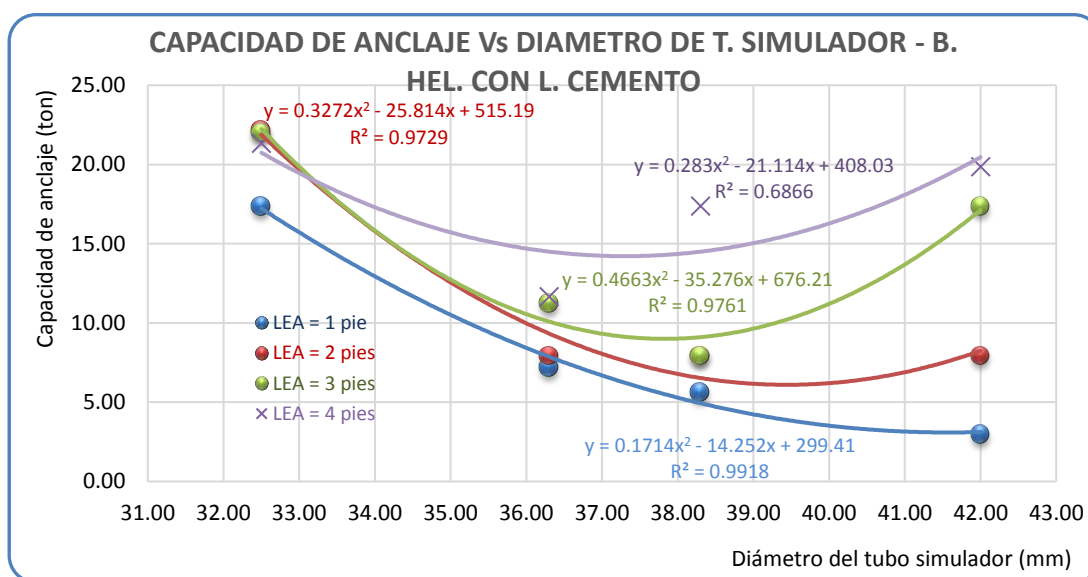


Figura 168. Capacidad de anclaje de las Barras Helicoidales instaladas con lechada de cemento en función del diámetro del tubo simulador

Fuente: Elaboración propia.

**7.3.3 Elongación en función de la carga aplicada y diámetro del tubo simulador.** La elongación que muestran las barras helicoidales instaladas con lechada de cemento, en diferentes tubos simuladores está compilados y procesados en formatos como detalla el Anexo A-6. De donde se presenta como modelo la figura 169, la elongación de las



barras helicoidales instaladas con lechada de cemento siendo la LEA de 2 pies. Se aprecia que sufren mayor elongación las muestras instaladas en tubos simuladores de 42 mm, seguido por los de 36,3 y 38,3 mm. Asimismo, se observa que sufre menor elongación en diámetro de 32,5 mm.

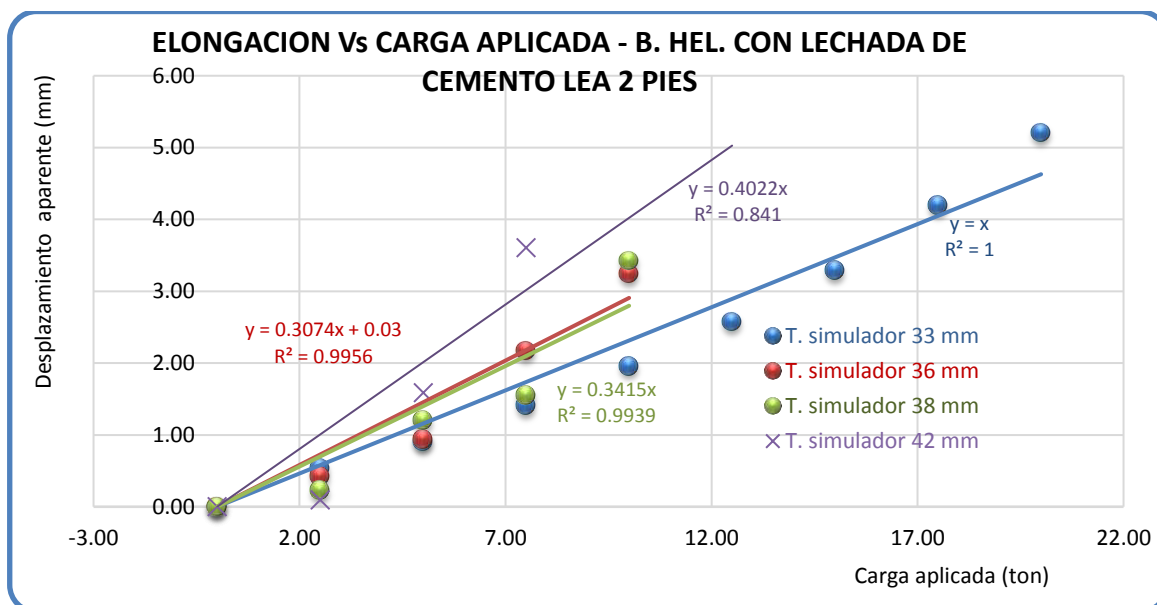


Figura 169. Elongación de las Barras Helicoidales Instaladas con Lechada de Cemento en Función de la Carga Aplicada

Fuente: Elaboración propia.

**7.3.4 Propiedades físicas de la lechada de cemento fraguado dentro de los tubos simuladores.** Para determinar las propiedades de la lechada de cemento fraguado o curado, su acoplamiento en la barra helicoidal y las paredes interiores de los tubos simuladores, posición de la barra, entre otros aspectos, se planificó seccionar muestras transversal y longitudinalmente. Sin embargo, al igual que en los casos anteriores, el seccionamiento longitudinal de pernos no fue posible, por las limitaciones indicadas. Las propiedades macroscópicas que se presentan en el Anexo D-3. Se determinaron de las muestras seccionadas, por observación y medición directa; mientras que las propiedades como: rugosidad, dureza, porosidad, ultrasonido, adherencia, etc. se determinaron en la FII, cuyo informe puede apreciarse en el Anexo E. Los ensayos correspondientes para determinar la densidad, absorción de agua, etc., se llevaron a cabo en la Escuela de Ing. Metalúrgica de la UNMSM.

**A) Seccionamiento de muestras.** Todas las muestras seleccionadas para este propósito, antes de proceder con el corte, en cada segmento se marcó el código original y el

número de sección empezando por la cabeza del perno con 0, como ilustra la figura 170, que corresponde al seccionamiento de la barra helicoidal instalada con lechada de cemento en tubo simulador de 42 mm, siendo la longitud efectiva de 4 pies (código BHLC-40-4'-2) y sección 1 y 2. Todos los cortes transversales se llevaron a cabo con la cortadora de metales Dewalt. Se seccionaron muestras para cada diámetro ensayado (32,5; 36,3; 38,3 y 42 mm); con la finalidad de hacer un análisis macroscópico e instrumental de las propiedades como: Porosidad, rugosidad, dureza, densidad, acoplamiento y adherencia en las paredes de los tubos y en la barra, Absorción de humedad y tratamiento térmico.



Figura 170. Seccionamiento de Barras Helicoidales Instaladas con Lechada de Cemento.  
Fuente: Elaboración propia.

**B) preparación de probetas.** Igual que para los casos anteriores, para realizar las pruebas instrumentales de las propiedades físicas de la lechada de cemento, se siguieron los mismos procedimientos. La figura 171, presenta las probetas de las barras helicoidales instaladas con lechada de cemento para los 4 diámetros estudiados.

**C) Posición de la barra helicoidal dentro del tubo simulador.** Este análisis se hizo sobre las muestras seleccionadas para cada diámetro ensayado, para cuyo propósito entre otros, se seccionaron las muestras como ilustran las figuras 172 (a) y 172 (b), que corresponden a las barras helicoidales instalados en tubos simuladores de 32,5 mm y 42 mm; se definieron las siguientes posiciones:

- Centrado: Cuando el eje de la barra helicoidal coincide con el eje del tubo simulador.



Figura 171. Probetas de la Barra Helicoidal Instaladas con Lechada de Cemento.

Fuente: Elaboración propia.

- Ligeramente descentrado: Cuando la barra helicoidal se presenta posicionado cerca al eje del tubo. Muestras de esta posición se observan en la parte inferior derecha de las figuras 172 (a) y 172 (b).
- Descentrado: la barra helicoidal se presenta cerca a la pared interior del tubo simulador. Un ejemplo de esta posición son las que muestran la parte superior e inferior izquierda de la figura 172 (b), que corresponde a la barra helicoidal instalada con lechada de cemento en tubo simulador de 42 mm de diámetro.
- Muy descentrado: Cuando la posición del perno está muy cerca o pegado a pared interior del tubo simulador. Este caso puede observarse como ejemplo, lo que presenta la figura 172 (a) en su parte superior e inferior izquierda.

Si bien en algunos segmentos seccionadas de las barras helicoidales se observan centradas, no significa que el perno esté centrado a lo largo del tubo simulador, esta posición se presenta únicamente por coincidencia del corte. Puesto que, observando la posición global de la barra helicoidal dentro de los tubos simuladores, en la mayoría de los casos, queda descentrada a muy descentrada, como se detalla en el en el anexo E.

**D) Porosidad.** En caso de la barra helicoidal instalado con lechada de cemento en tubo simulador de 32,5 mm, que ilustra la figura 173 (a), se notan 26 poros que van de 0,2 a 1,05 mm de diámetro. La figura 173 (b) presenta a la barra helicoidal instalada con lechada de cemento en tubo simulador de 36,3 mm, donde se nota 49 poros de 0,1 a 1,70 mm de diámetro. Para la barra helicoidal instalada con lechada de cemento en tubo simulador de 38,3 mm, cuyo ejemplo se presenta en la figura 173 (c), se notan 38 poros cuyos diámetros van de 0,15 a 2,80 mm. Finalmente, cuando la barra helicoidal se instalada con lechada de cemento en tubo de 42 mm, cuyo ejemplo ilustra la figura 173 (d), se observan 36 poros cuyos tamaños van de 0,05 a 2,62 mm.



(a)



(b)

Figura 172. Posición de la Barra Helicoidal Instalada con Lechada de Cemento en Distintos Segmentos de Tubos Simuladores. (a) En 33 mm de Diámetro. (b) En 42 mm de Diámetro.

Fuente: Elaboración propia.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 173. Porosidad de la Lechada de Cemento Fraguada en Distintos Diámetros de Tubos Simuladores en Corte Transversal. (a) Diámetro 32,5 mm. (b) Diámetro 36,3 mm. (c) Diámetro 38,3 mm. (d) Diámetro 42 mm

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a las figuras precedentes, la formación de poros tanto en tamaño como en número, tiende a ser mayor en tubos simuladores más grandes. Las figuras 175 (b), 176 (b) y 177 (b), ilustran la porosidad de la lechada de cemento en muestras seccionadas longitudinalmente. En cada una de estas figuras, se observa la lechada de cemento bastante porosa, sobre todo hacia las paredes interiores de los tubos simuladores.

**E) Acoplamiento y adherencia.** Como puede apreciarse en las figuras 172 y 173, que muestran el acoplamiento en sección transversal, en general el acoplamiento de la lechada de cemento tanto en la barra helicoidal y la pared del tubo simulador es buena, situación que se observa en todos los segmentos seccionados. El acoplamiento de la lechada de cemento en los segmentos seccionados longitudinalmente, se repite lo observado en los cortes transversales, como ilustran las figuras 174; 175; 176 y 177.

La adherencia de la lechada cemento en la barra helicoidal, es mayor que en la pared interior de los tubos simuladores, puesto que al tratar de desprenderla ofrecía más resistencia, prueba de ello es que quedan restos de lechada adheridos en las roscas de la barra helicoidal, como ilustran las figuras 174 (a), 175 (a), 176 (a) y 177 (a), que corresponden a los diámetros de 32,5; 36,3; 38,3 y 42 mm, respectivamente. En cambio, en las paredes de los tubos simuladores (similar a un taladro en roca), se observa que la lechada cemento tiene poca adherencia, es por ello que se desprende con más facilidad, dejando la pared interior de los tubos simuladores limpio, como ilustran las figuras 174 (b), 175 (b), 176 (b) y 177 (b), que son respectivamente para cada diámetro ensayado.

La adherencia de la lechada de cemento tanto en la barra helicoidal como en la pared interior del tubo simulador, además de la edad del cemento, proporción de cemento/agua, tiempo de fraguado, se ve seriamente afectada por:

a) la presencia de óxido en la superficie de la barra y la pared del tubo simulador, la pátina de óxido actúa como un repelente, reduciendo la adherencia de la lechada de cemento, como ilustra las figuras 177 (a) y 178 (a), donde se aprecia que la pátina de óxido de hierro ha impedido que la lechada de cemento se adhiera adecuadamente a la barra helicoidal.

b) Porosidad ocasionada por el aire atrapado durante la instalación de las barras helicoidales, siendo más notorio en diámetros mayores que en pequeños, como puede corroborarse en las figuras 174 (b), 176 (b), 177 (b) y 178 (b), en las que se aprecia la lechada de cemento completamente poroso y la pared del tubo simulador donde estuvo acoplado completamente limpio.





(a)



(b)

*Figura 174. Adherencia y Acoplamiento de la Lechada de Cemento en Tubo Simulador de 32,5 mm. (a) En la Barra Helicoidal. (b) En la Pared del Tubo Simulador.*

Fuente: Elaboración propia.

c) La combinación de los factores anteriores, afectará aún más seriamente la adherencia de la lechada de cemento, una muestra de ello puede observarse en la figura 178 (b), que en su parte superior muestra como el óxido y la porosidad han impedido que la lechada se adhiera a la pared del tubo.



(a)



(b)

*Figura 175. Adherencia y Acoplamiento de Lechada de Cemento en Tubo Simulador de 36,3 mm. (a) En la Barra Helicoidal. (b) En la Pared del Tubo Simulador*

Fuente: Elaboración propia.





(a)

(b)

*Figura 176. Adherencia y Acoplamiento de la Lechada de Cemento en Tubo Simulador de 38,3 mm. (a) En la Barra Helicoidal. (b) En la Pared del Tubo Simulador*

Fuente: Elaboración propia.

Al margen de las condiciones en que se encontraban instaladas las barras helicoidales con lechada de cemento dentro de los tubos simuladores, se realizaron las pruebas de Charpy en la FII, con la finalidad de evaluar su comportamiento a los impactos del péndulo, básicamente la adherencia. Para lo cual, se utilizaron las probetas preparadas entre otros para este fin, es decir, una probeta por cada diámetro en estudio. Idéntico a los dos casos anteriores, fue sometido a 3 niveles de impacto de 50°, 60° y 70°.



(a)



(b)

*Figura 177. Adherencia y Acoplamiento de la Lechada de Cemento en Tubo Simulador de 42 mm. (a) En la Barra Helicoidal. (b) En la Pared del Tubo Simulador*

Fuente: Elaboración propia.



(a)

(b)

*Figura 178. Factores que Afectan la Adherencia. (a) Oxido en la Barra Helicoidal. (b) Porosidad en la Lechada de Cemento.*

Fuente: Elaboración propia.

La figura 179, ilustra a la probeta correspondiente a la barra helicoidal instalada con lechada de cemento en tubo simulador de 38 mm, donde la figura 179 (a), corresponde a la probeta antes de someterse a la prueba de Charpy. Cuando el péndulo se dejó caer con ángulo de 50°, el conjunto barra helicoidal y lechada de cemento sufrieron un ligero desplazamiento en la pared interior del tubo simulador, como ilustra la figura 179 (b). Al caer el péndulo de 60°, la lechada con la barra helicoidal incluida, siguió desplazándose en la pared interior del tubo simulador, sin un daño notorio en la lechada fraguada, como ilustra la figura 179 (c). Para el ángulo de caída de 70°, prosiguió el desplazamiento hasta 2,65 mm (acumulado) del conjunto a través de la pared del tubo simulador y produciendo un conjunto de fisuras a la lechada de cemento, como puede apreciarse en la figura 179 (d).

**F) Aspereza / rugosidad.** En las superficies de los cortes de los segmentos, se hizo una apreciación de la aspereza al tacto, llegándose a la conclusión que, en todos los casos, se siente liso al tacto. La medición instrumental de la rugosidad, al igual que para los casos anteriores, antes y después del tratamiento térmico a 200 °C de temperatura. Con los valores registrados y compilados, se obtuvo los promedios de rugosidad por zona, por muestra y finalmente un promedio global. Las mediciones antes y después del choque térmico, arrojan promedios globales de 1,093  $\mu\text{m}$  y 1,237  $\mu\text{m}$ , respectivamente. Lo cual indica que, al someter las muestras a 200 °C, la rugosidad de la lechada de cemento aumenta.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 179. Estado de la Lechada de Cemento por la Acción del Péndulo Charpy. (a) Probeta antes de la Prueba. (b) Caída de 50°. (c) Caída de 60°. (d) Caída de 70°.

Fuente: Elaboración propia.

**G) Dureza.** Similar para los casos del cementicio y resina, se ensayó rayar la lechada de cemento con los cristales de calcita (3), fluorita (4), apatito (5) y ortosa (6); observándose que los cristales hasta el apatito no rayan a la lechada de cemento, pero sí, el cristal de ortosa y una navaja de acero. Por consiguiente, según la escala de Mohs, la dureza de la lechada de cemento sería 5,5 (por rayarse con la navaja).

La medición instrumental de la dureza de la lechada de cemento que ilustra la figura 180, donde el patrón de dureza es el Demeq de una cara. Usa el método normalizado de Leeb, escala HL (Hardness Leeb), cuyos valores promedios parciales y totales, se resume en

la tabla 35. Asimismo, con esos resultados se determina que la dureza promedio de la lechada de cemento es 376 HL.

Tabla 35

*Dureza HL de la Lechada de Cemento Fraguada*

Diámetro	Dureza lechada de cemento (HL)		
	Base superior	Base inferior	Promedio
33	403,0	430,0	416,5
36	343,8	348,3	346,0
38	355,0	375,0	365,0
40	361,5	398,3	379,9

Fuente: Elaboración propia.



Figura 180. Ensayos de Dureza de la Lechada de Cemento Fraguada.

Fuente: Elaboración propia.

**H) Densidad.** Para determinar esta propiedad, se siguió el mismo procedimiento que en los casos anteriores, en laboratorio de la EAP de Ingeniería Metalúrgica de la UNMSM para cada diámetro establecido, cuyos resultados se presenta en la tabla 36, de donde se deduce que la densidad promedio de la lechada de cemento curado es 1,915 g/cc.

**I) Absorción de agua – hidratación.** Los ensayos para determinar la capacidad de absorción de agua de la lechada de cemento curado, se llevó a cabo en el laboratorio de la EAP Ingeniería Metalúrgica, haciendo uso de la misma balanza usado en las combinaciones anteriores, que ilustra la figura 181 (a). Asimismo, se siguió el mismo



procedimiento sobre las probetas que se presenta en la Figura N° 181 (b), lo que se remojaron por el mismo tiempo y condiciones que el cementicio y la resina. La tabla 37, resume los resultados obtenidos para este cementante, donde se observa que el porcentaje de agua absorbida aumenta con el diámetro, debido a mayor masa de lechada de cemento, siendo el promedio global de dichos valores 0,65 %.



Figura 181. Ensayo para Determinar la Capacidad de Absorción de Agua por la Lechada de Cemento. (a) Pesaje la Probeta seca. (b) Probetas Secas. (c) Probetas Húmedas.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 36

*Densidad de la Lechada de Cemento fraguada Vs Diámetro de Tubo Simulador*

Diámetro del tubo simulador (mm)	Densidad de la lechada de cemento fraguada (g/cc)
32,50	1,880
36,30	1,833
38,30	1,956
42,00	1,990

Fuente: Elaboración propia.

### **J) tratamiento térmico**

Este ensayo se realizó en el laboratorio de la FII, donde se siguió los mismos pasos y metodologías que para los casos anteriores. Los resultados del ensayo a 100 °C, muestran que las probetas no sufrieron ninguna alteración visible.

El tratamiento térmico a 200 °C y 400 °C de temperatura, se aplicó a las muestras que ilustra la figura 182, donde el primero de la izquierda corresponde al diámetro de 32,5 mm y el último de la derecha a 42 mm. La figura 183 muestra el estado de las muestras después del tratamiento térmico a 200 °C de temperatura, como puede observarse en esta figura la lechada de cemento no sufrió cambios visibles, salvo una ligera variación en su coloración.

Tabla 37

*Absorción de Agua por la Lechada de Cemento Vs Diámetro de Tubo Simulador*

Diámetro de tubo (mm)	Absorción de agua por la lechada de cemento fraguada (%)
32,50	0,34
36,30	0,56
38,30	0,82
42,00	0,88

Fuente: Elaboración propia.



Figura 182. Muestras de Lechada de Cemento Liberadas del Tubo y la Barra Helicoidal Antes de su Tratamiento Térmico

Fuente: Elaboración propia.

Sometido las muestras al tratamiento térmico a la temperatura de 400 °C, por el mismo tiempo de exposición que las muestras de cementicio y resina, como resultado se observa que la lechada de cemento tampoco sufre cambios sustanciales, como ilustra la figura 184, únicamente algunos fisuramientos, debido al cambio brusco de temperatura al extraerla de la mufla.





*Figura 183. Estado de las Muestras de Lechada de Cemento Después del Tratamiento Térmico a 200 °C.*  
Fuente: Elaboración propia.



*Figura 184. Estado de las Muestras de Lechada de Cemento, Después del Tratamiento Térmico a 400 °C.*  
Fuente: Elaboración propia.

## **Capítulo 8**

### **Discusión de Resultados de la Optimización de Diámetro de Taladros**

En este capítulo, se discuten los resultados presentados en los capítulos anteriores, referentes a los diferentes tipos pernos de roca estudiados, empezando la discusión, por familias de pernos y luego en forma conjunta para todos los tipos, a fin de establecer los diámetros óptimos de los taladros donde deben instalarse cada uno de ellos. Dentro de este contexto, se discuten las capacidades de anclaje de los pernos de roca en función de la longitud efectiva de anclaje (LEA) y diámetro del tubo simulador (taladro); las elongaciones y los contactos y aberturas que se generan al instalar los diferentes tipos de pernos dentro de los tubos simuladores o taladros. Finalmente, se hace una discusión comparativa de las capacidades de anclaje mostradas por diferentes tipos de pernos de roca estudiados en la mina Castrovirreyna (ensayo en terreno), con las obtenidas en el laboratorio, usando tubos simuladores, siendo los diámetros de taladros y tubos simulares en ambos casos los mismos.

#### **8.1 Discusión de Resultados del Estudio de los Pernos Inflables Hydrabolt y Swellex (X-Pandabolt)**

**8.1.1 Capacidad den anclaje en función de la longitud efectiva de anclaje.** Los promedios de la capacidad de anclaje de los pernos inflables Hydrabolt y X-Pandabolt (Swellex), se presentan en resumen en la tabla 38, analizados en función de la LEA para los diámetros de tubos simuladores empleados. Como puede observarse en la figura 185, los Swellex instalados en tubos simuladores de 32,5 mm (33 mm), muestran la menor capacidad de anclaje, seguido por los instalados en tubos simuladores de 36,3 mm (36 mm). La combinación que presenta mayor capacidad de anclaje corresponde al Hydrabolt instalado en tubos simuladores de 38,3 mm (38 mm), seguido por el X-Pandabolt instalado en tubo simulador de 40,96 mm (40 mm).

Tabla 38

Capacidad de Anclaje de los Pernos de Hydrabolt y Swellex (X-Pandabolt) en Función de la LEA en Diferentes Diámetros de Tubos Simuladores

LEA (Pies)	Capacidad de anclaje (ton)							
	Diám. T. S. = 33 mm		Diám. T. S. = 36 mm		Diám. T. S. = 38 mm		Diám. T. S. = 40 mm	
	Hydrabolt	Swellex	Hydrabolt	Swellex	Hydrabolt	Swellex	Hydrabolt	Swellex
1.00	9.52	1.43	9.52	4.76	9.52	6.50	11.42	8.41
2.00	9.52	2.38	13.32	6.34	15.23	12.13	13.32	13.32
3.00	11.42	3.57	13.32	9.52	15.23	14.27	15.23	15.23
4.00	13.32	8.33	15.23	13.80	15.23	15.23	15.23	15.23

Fuente: Elaboración propia.

Se observa que, los Hydrabolt instalados en tubos simuladores de 38,3 mm; 40,96 mm y 36,3 mm y, los Swellex instalados en tubos simuladores de 40,96 mm y 38,3 mm, muestran que la capacidad de anclaje de estos pernos, se tornan asintóticas a partir de 3 pies de LEA. Se concluye que el diámetro óptimo para instalar los Hydrabolt sería 38,3 mm (38 mm) y 40,96 mm (40 mm) para instalar los Swellex.

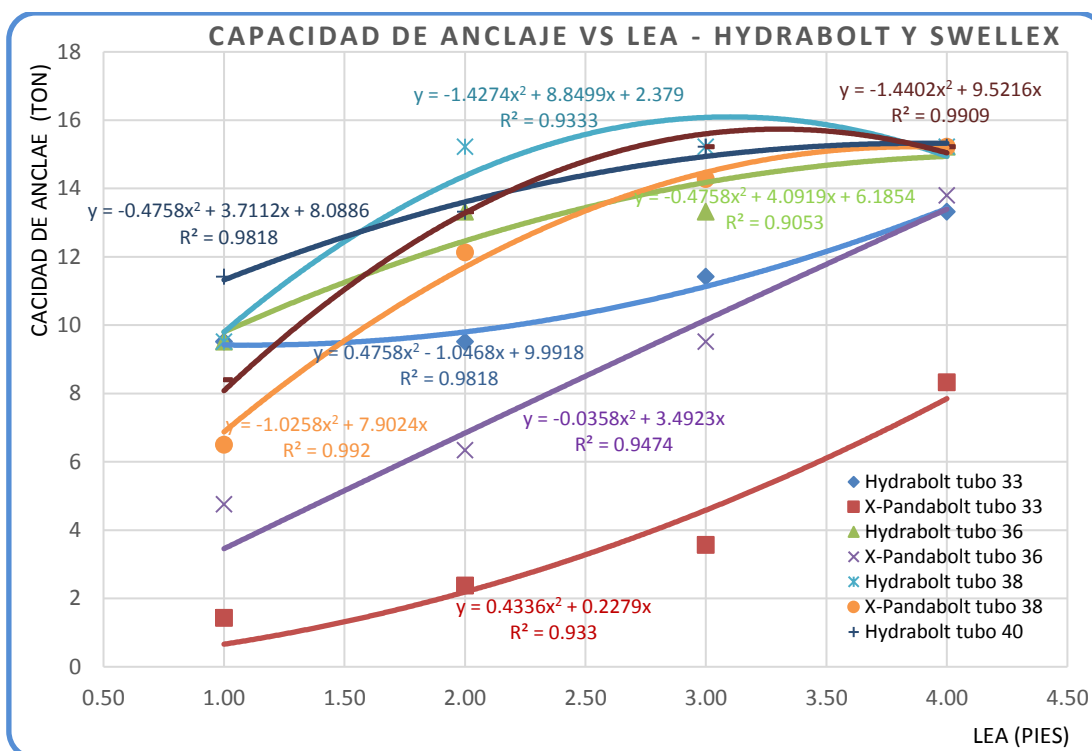


Figura 185. Capacidad de Anclaje de los Pernos Hydrabolt y Swellex (X-Pandabolt) Vs LEA

Fuente: Elaboración propia.

**8.1.2 Capacidad de anclaje de los pernos hydrabolt y x-pandabolt en función del diámetro del tubo simulador.** La capacidad de anclaje promedio de los pernos Hydrabolt y Swellex en función del diámetro de los tubos simuladores para las diferentes LEAs, se presenta en la tabla 39, graficando los valores correspondientes se obtiene la figura 186, donde se observa que el Hydrabolt de 4 pies muestra mayor capacidad de anclaje,

mostrándose creciente hasta 38 mm de diámetro, para diámetros superiores se torna asintótica. Los Swellex de 4 pies le siguen capacidad de anclaje a los Hydrabolt de 4 pies, con comportamiento creciente hasta 40 mm de diámetro de tubo simulador. Con estos resultados, se confirma que los diámetros óptimos para instalar los pernos Hydrabolt y Swellex, son respectivamente 38 y 40 mm.

Tabla 39

Capacidades de Anclaje Promedio de los Pernos Hydrabolt y Swellex en Función del Diámetro de los Tubos Simuladores

Diámetro del tubo simulador (mm)	Capacidad de anclaje (ton)							
	LEA = 1 pie		LEA = 2 pies		LEA = 3 pies		LEA = 4 pies	
	Hydrabolt	X-Pandabolt	Hydrabolt	X-Pandabolt	Hydrabolt	X-Pandabolt	Hydrabolt	X-Pandabolt
32.50	9.52	1.43	9.52	2.38	11.42	3.57	13.32	8.33
36.30	9.52	4.76	13.32	6.34	13.32	9.52	15.23	13.80
38.30	9.52	6.50	15.23	12.13	15.23	14.27	15.23	15.23
40.96	11.42	8.41	13.32	13.32	15.23	15.23	15.23	15.23

Fuente: Elaboración propia.

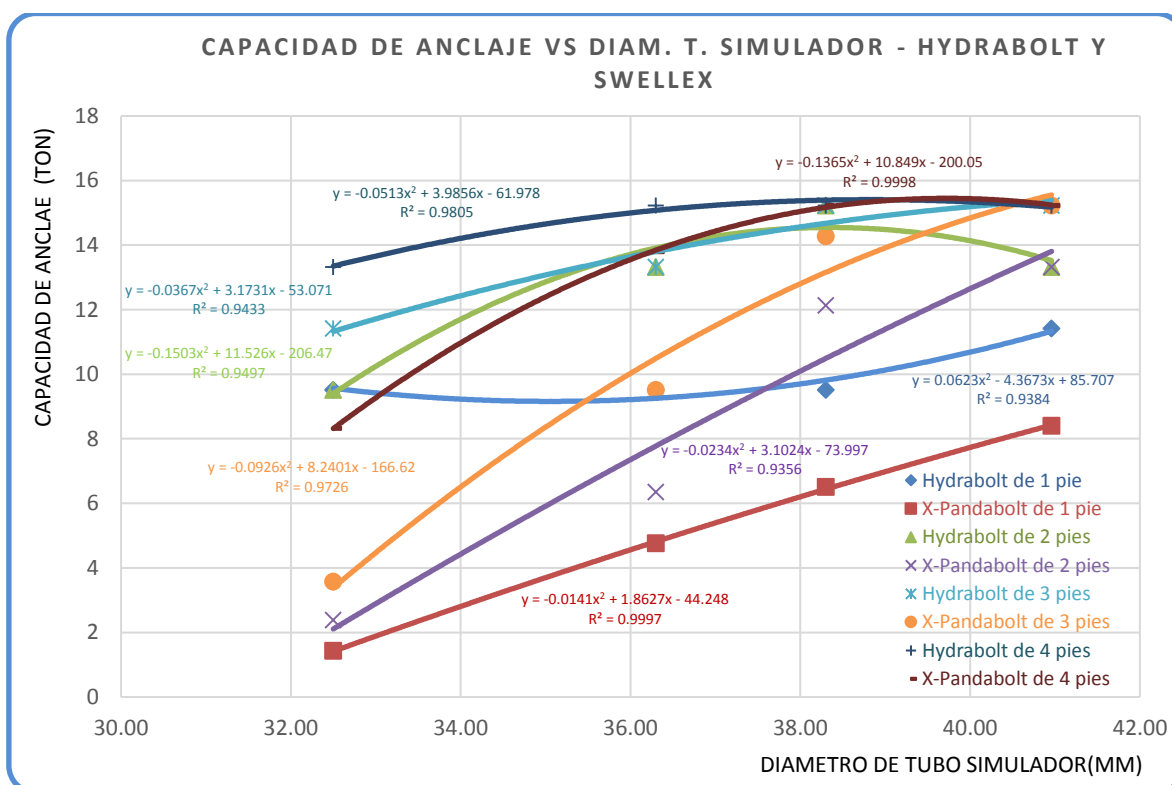


Figura 186. Capacidad de Anclaje Comparativo de los Pernos Hydrabolt y Swellex Función del Diámetro de los Tubos Simuladores

Fuente: Elaboración propia.

La alternativa de combinación perno, diámetro y LEA, que arroja menor capacidad de anclaje, son los Swellex de 1 pie seguido por el de 2 pies de LEA. Una particularidad en este caso, es que tiende a seguir ascendiendo como aumenta el diámetro del tubo simulador, es decir, no tiende a ser asintótica.

**8.1.3 Elongación en función de la carga aplicada y diámetro del tubo simulador.** De acuerdo a lo demostrado arriba, los pernos Hydrabolt y Swellex muestran mayor capacidad de anclaje para 4 pies de LEA en diámetros de 38 y 40 mm respectivamente. Esta es la razón por la cual, se discute la elongación para esta LEA en diferentes diámetros de tubos simuladores, cuyos promedios en resumen se presentan en la tabla 40. Como puede observarse la figura 187, el comportamiento de la elongación de estos pernos guarda una relación lineal con la carga aplicada.

Tabla 40

Elongación Vs Carga Aplicada para 4 pies de LEA de los Pernos Hydrabolt y Swellex

Carga aplicada (ton)	Elongación para 4 pies de LEA							
	Diámetro 33 mm		Diámetro 36 mm		Diámetro 38 mm		Diámetro 40 mm	
	Hydrabolt	Swellex	Hydrabolt	Swellex	Hydrabolt	Swellex	Hydrabolt	Swellex
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.90	0.17	0.02	0.05	0.44	0.13	0.15	0.02	0.14
3.81	0.41	0.05	0.37	1.04	1.02	0.49	0.73	0.77
5.71	0.89	0.27	0.90	1.66	1.43	1.49	1.44	1.21
7.61	1.70	0.66	1.61	2.59	2.34	1.97	1.99	2.03
9.52	1.40	0.93	1.96	3.45	3.08	2.80	2.69	2.83
11.42	2.05	1.39	2.85	4.37	3.81	3.63	3.68	3.82
13.32	3.02	1.80	4.19	5.46	4.24	6.15	5.57	5.92

Fuente: Elaboración propia.

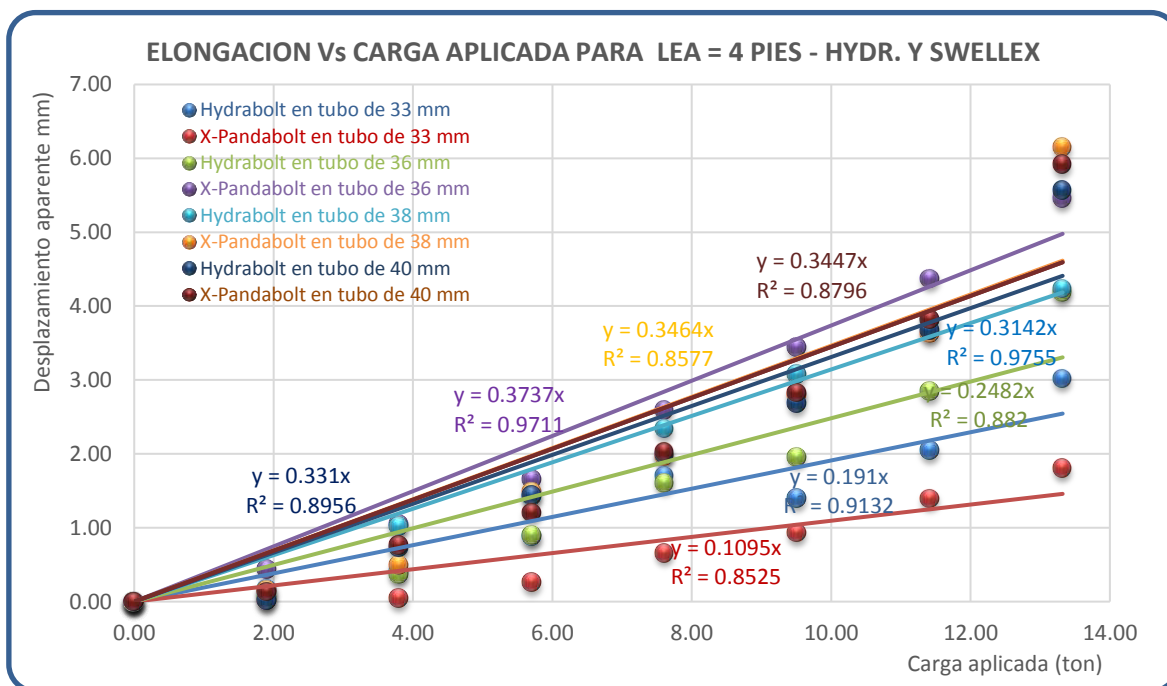


Figura 187. Elongación de los Pernos Hydrabolt y Swellex para 4 pies de LEA en Diferentes Diámetros de Tubos Simuladores.

Fuente: Elaboración propia.

El perno Swellex instalado en tubo simulador de 36,3 mm la alternativa que muestra mayor elongación, y la que muestra menos elongación es el perno Swellex instalado en tubo

simulador de 32,5 (33 mm), seguido por el Hydrabolt instalado en tubo simulador de 32,5 mm (33 mm). El Hydrabolt instalado en tubo simulador de 38,3 mm muestra similar elongación que el Swellex instalado en tubo simulador de 40,96 mm.

**8.1.4 Aberturas y contactos.** Tanto los Hydrabolt como los Swellex cuando se instalan dentro de los tubos simuladores, no se acoplan completamente. Se generan franjas de aberturas de diferentes anchos como ilustra la figura 188, donde la fila superior corresponde a los Hydrabolt instalados en tubos simuladores de 30; 32,5; 36,3; 38,3 y 40,96 mm, mientras que la fila inferior a los Swellex instalados en los mismos tubos. El número y dimensiones promedios de las aberturas que se generan en estos dos tipos de pernos se presentan en resumen en la tabla 41, además de la abertura generada por el pliegue de fabricación de estos pernos, pliegues que van adoptando diferentes formas de acuerdo al diámetro de tubo simulador, al tratar de acoplarse a la pared en éste durante el inflado.



Figura 188. Acoplamiento de los Pernos Hydrabolt y Swellex en las Paredes de los Tubos Simuladores.  
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 41

*Número de Aberturas Generados y sus Dimensiones Promedio de Acuerdo al Diámetro del Tubo Simulador en los pernos Hydrabolt y Swellex*

Diám. de tubo sim. (mm)	Abertura 1 (mm)		Abertura 2 (mm)		Abertura 3 (mm)		Abertura 4 (mm)		Abertura debido al pliegue (mm)	
	Hydrabolt	Swellex	Hydrabolt	Swellex	Hydrabolt	Swellex	Hydrabolt	Swellex	Hydrabolt	Swellex
32.5	10.65	11.41	10.85	11.42					16.61	16.76
36.3	11.82	10.37	9.12	13.51					17.64	20.69
38.3	7.36	15.06	9.69	14.11	6.96	4.80			18.15	19.47
40.96	8.94	5.18	10.84	14.27	10.10	11.98		6.34	20.09	17.65

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 42, presenta los promedios de las áreas con o sin contacto que se generan cuando se instalan los pernos Hydrabolt y Swellex en tubos simuladores de diferentes



diámetros. Las aberturas que se generan, reducen las áreas de contacto, cuyos promedios en resumen se presenta en la tabla 42. En la figura 189, se puede apreciar que los Hydrabolt muestran mayor área de contacto que los Swellex, para todos los diámetros de tubos simuladores ensayados. Asimismo, el área sin contacto debido al pliegue del perno es menor en los Hydrabolt. Cabe destacar que, para hacer este análisis, antes de seccionar las muestras de Hydrabolt, fue necesario descargar la presión del agua retenida en su interior, quedando bajo esa condición igual que los Swellex o sus similares, a pesar de ello, muestran mayor área de contacto, es decir, mejor acoplamiento.

Tabla 42

Áreas con o sin Contacto Debido a las Aberturas y Pliegues de los Pernos Hydrabolt y Swellex

Diámetro del tubo simulador (mm)	Área de contacto sin contacto (%)			Área de contacto sin contacto (%)		
	Hydrabolt			Swellex		
	Área de contacto (%)	Área sin contacto (%)	Área sin contacto debido al pliegue (%)	Área de contacto (%)	Área sin contacto (%)	Área sin contacto debido al pliegue (%)
32.5	46.86	53.14	12.28	41.68	58.32	12.69
36.3	46.56	53.44	13.62	47.81	52.19	16.13
38.3	55.82	44.18	13.31	47.54	52.46	14.95
40.96	60.93	39.07	16.85	51.96	48.04	13.98

Fuente: Elaboración propia.

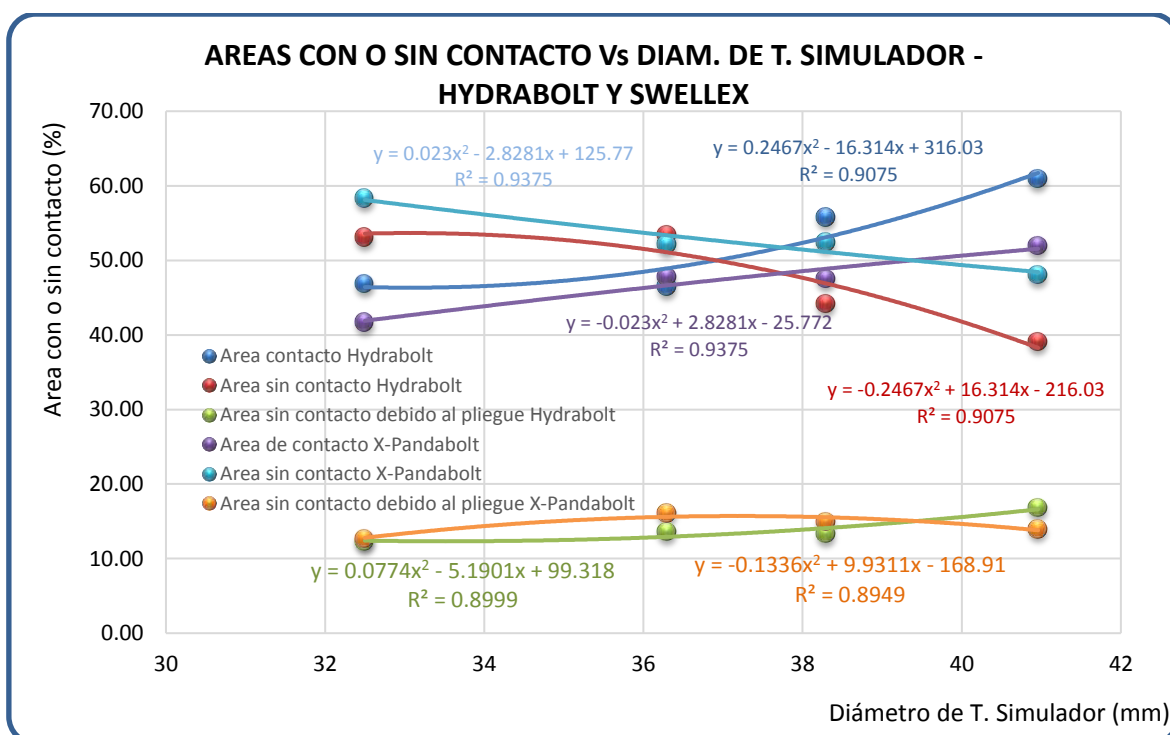


Figura 189. Áreas con o sin Contacto en los Hydrabolt y Swellex (X-Pandabolt) Vs Diámetro del tubo simulador

Fuente: Elaboración propia.

## 8.2 Discusión de Resultados de la Barras Helicoidales Instaladas con Cartuchos de Cementicio Y Resina y, Lechada de Cemento

### 8.2.1 Capacidad anclaje en función de la longitud efectiva de anclaje.

A) *en tubos simuladores de 32,5 mm (33 mm) de diámetro.* Como puede apreciarse en la tabla 43 y la figura 90, la capacidad de anclaje de las barras helicoidales instaladas en tubos simuladores de 32,5 mm (33 mm), es similar para los tres tipos de materiales de acoplamiento (cartuchos de cementicio, cartuchos de resina y lechada de cemento), con ligera ventaja cuando se instalan con lechada de cemento. Asimismo, para los tres tipos de materiales de acoplamiento, la longitud efectiva de anclaje (LEA) óptima es 3 pies, puesto que, a partir de esta longitud, su capacidad de anclaje se torna asintótica.

Por consiguiente, de instalarse las barras helicoidales en diámetros de taladro similares al de este tubo simulador, la longitud de perno como sostenimiento en una excavación, debe dimensionarse teniendo en consideración esta LEA, puesto que longitudes superiores a ésta, será innecesario.

Tabla43

*Capacidad de Anclaje de las Barras Helicoidales Instaladas con Cartuchos de Cementicio, Resina y Lechada de Cemento en Tubos Simuladores de 32,5 mm*

LEA (pies)	Capacidad de anclaje en tubos simuladores de 32,5 mm		
	B. Helic. C. Cementicio	B. Helic. C. Resina	B.Helic. L. Cemento
1	15,88	19,85	17,37
2	20,83	21,25	22,17
3	21,00	21,00	22,00
4	21,67		21,33

Fuente: Elaboración propia.

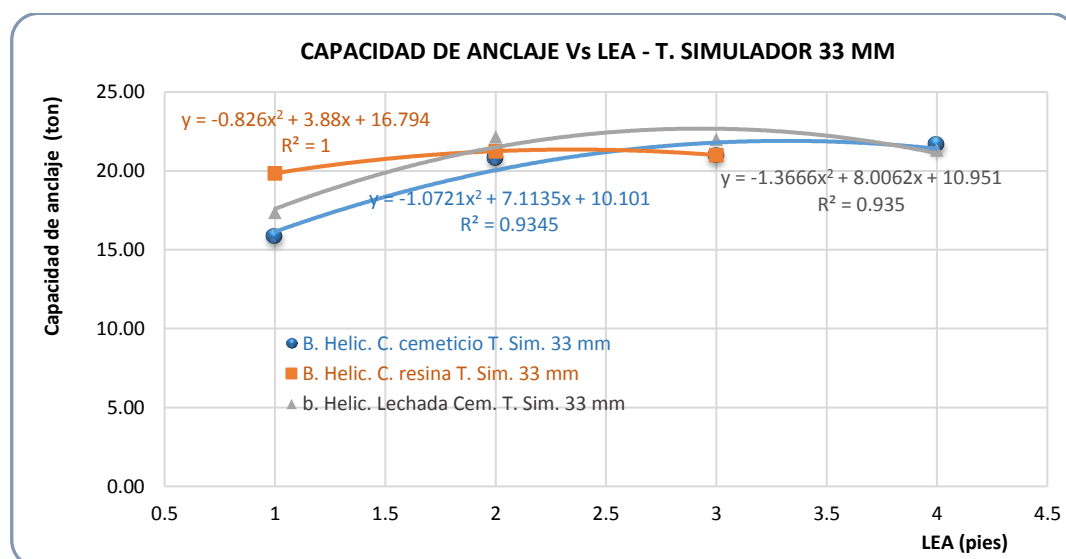


Figura 190. Capacidad de anclaje de las barras helicoidales instaladas en tubos simuladores de 32,5 mm (33 mm) con cartuchos de cementicio y resina y, lechada de cemento en función de la LEA.

Fuente: Elaboración propia.

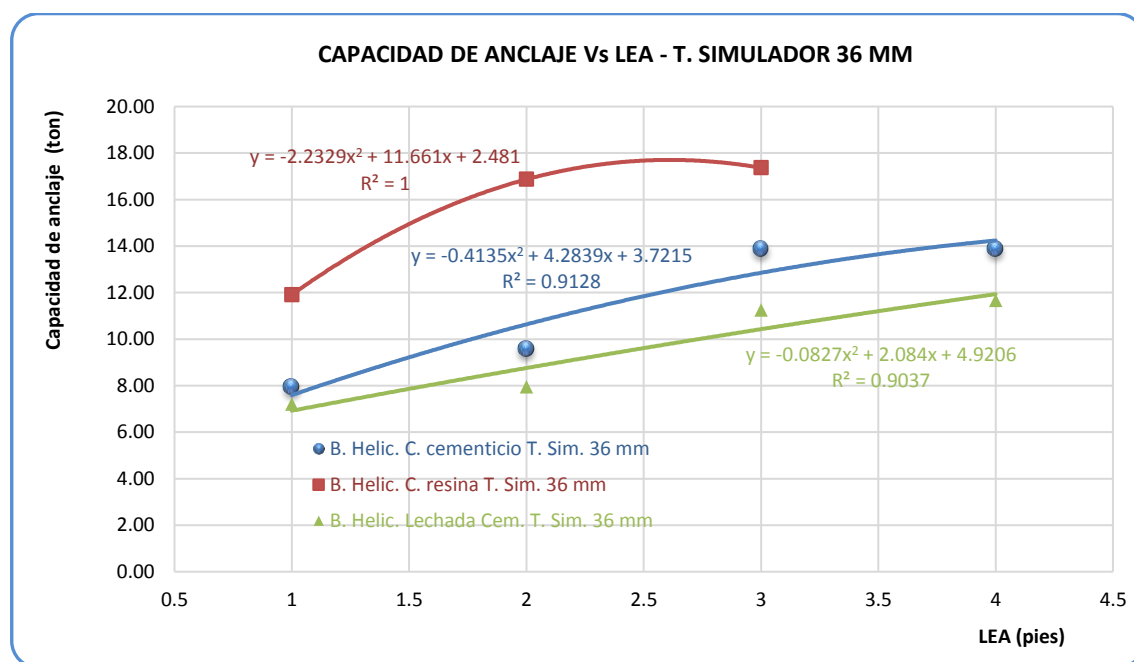
**B) En tubos simuladores de 36,3 mm (36 mm) de diámetro.** Cuando se instalaron las barras helicoidales en tubos simuladores de 36,3 mm (36 mm) de diámetro, mostraron mayor capacidad de anclaje las instaladas con cartuchos de resina, seguido por las instaladas con cartuchos de cementicio, como puede apreciarse en la tabla 44 y la figura 191. Sin embargo, las barras helicoidales instaladas con cartuchos de resina, muestran capacidad de anclaje ascendente hasta 2,5 pies de LEA, mientras que para los cartuchos de cementicio y lechada de cemento, hasta 4 pies.

Tabla 44

*Capacidad de Anclaje de las Barras Helicoidales Instaladas con Cartuchos de Cementicio, Resina y Lechada de Cemento en Tubos Simuladores de 36,3 mm (36 mm)*

LEA (pies)	Capacidad de anclaje en tubos simuladores de 36 mm		
	B. Helic. C. Cementicio	B. Helic. C. Resina	B. Helic. L. Cemento
1	7,94	11,91	7,19
2	9,59	16,87	7,94
3	13,89	17,37	11,25
4	13,89		11,66

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 191.** Capacidad de Anclaje de las Barras Helicoidales Instaladas en Tubos Simuladores de 36,3 mm (36 mm) con Cartuchos de Cementicio, Resina y Lechada de Cemento en Función de la LEA.

Fuente: Elaboración propia.

**C) En tubos simuladores de 38,3 mm (38 mm) de diámetro.** La capacidad de anclaje de las barras helicoidales instaladas en tubos simuladores de 38,3 mm (38 mm), muestra mayor valor con cartuchos de cementicio para 3 pies de LEA, no obstante que para 1 pie de LEA una capacidad baja (3,97 ton). Sin embargo, con cartuchos de resina, muestra

una capacidad de anclaje uniforme como varía la LEA, tal es así que, para 1 pie muestra una capacidad de anclaje de 9,92 ton y para 2 y 3 pies 11,91 ton. Con lechada de cemento, muestra una capacidad de anclaje ascendente como aumenta la LEA. Este resultado puede apreciarse en la tabla 45 y la figura 192.

Tabla 45

*Capacidad de Anclaje de las Barras Helicoidales Instaladas con Cartuchos de Cementicio, Resina y Lechada de Cemento en Tubos Simuladores de 38,3 mm Vs LEA*

LEA (pies)	Capacidad de anclaje en tubos simuladores de 38 mm (ton)		
	B. Helic. C. Cementicio	B. Helic. C. Resina	B. Helic. Lechada de Cemento
1	3,97	9,92	5,62
2	11,25	11,91	7,94
3	13,89	11,91	7,94
4	13,56		11,08

Fuente: Elaboración propia.

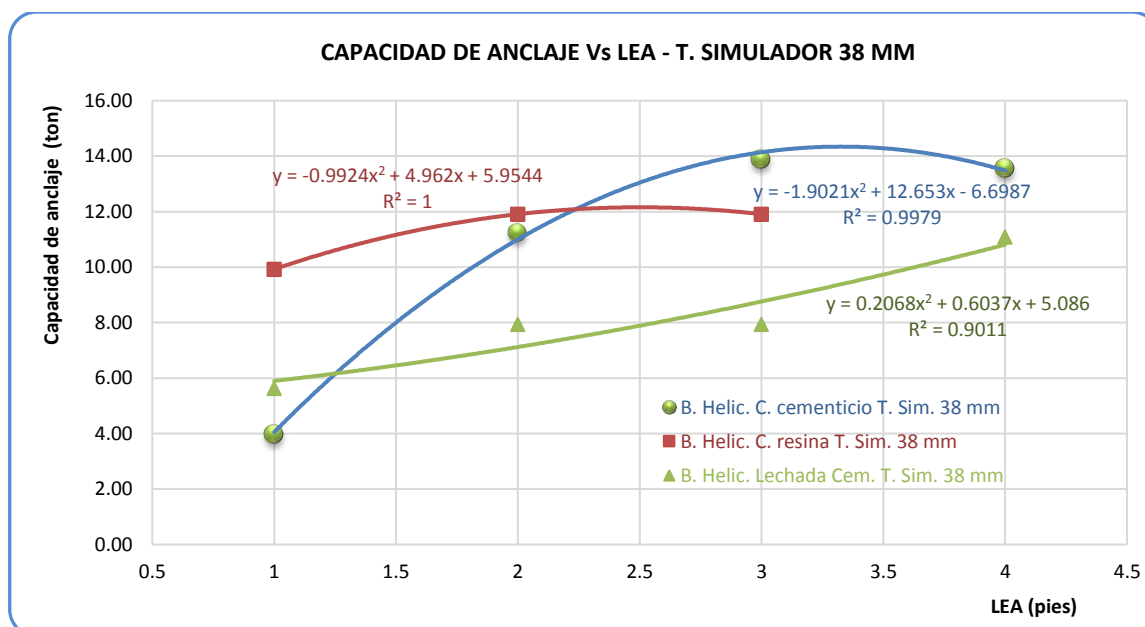


Figura 192. Capacidad de Anclaje de la Barra Helicoidal Instaladas en Tubos Simuladores de 38,3 mm con Cartuchos de Cementicio, Resina y Lechada de Cemento en Función de la LEA

Fuente: Elaboración propia.

En caso de las barras helicoidales instaladas con cartuchos de cementicio, la LEA óptima sería 3 pies, puesto que, por encima de este valor, la capacidad de anclaje tiende mantenerse asintótica o ligeramente decreciente. Para las barras helicoidales instaladas con cartuchos de resina, su capacidad de anclaje se muestra creciente hasta 2,5; mientras que para las instaladas con lechada de cemento tiende a seguir aumentando por encima de los 4 pies de LEA.

**D) En tubos simuladores de 42 mm.** Para 3 pies de LEA, la capacidad de anclaje de las barras helicoidales instaladas con cartuchos de cementicio, cartuchos de resina y lechada de cemento, son prácticamente iguales, como puede apreciarse en la tabla 46. Sin embargo, muestra mayor capacidad de anclaje instalada con cartuchos de resina hasta 2 pies de LEA (19,35 ton), por encima de las instaladas con los otros dos materiales de acoplamiento. Sin embargo, la barra helicoidal instalada con cartuchos de cementicio, alcanza 21,34 ton de capacidad de anclaje para 4 pies de LEA, por encima de esta longitud tiende tornarse asintótica, como puede apreciarse en la figura 193. La combinación barra helicoidal lechada de cemento, muestra menor capacidad de anclaje, pero con tendencia a seguir aumentando su capacidad de anclaje por encima de los 3 pies de LEA.

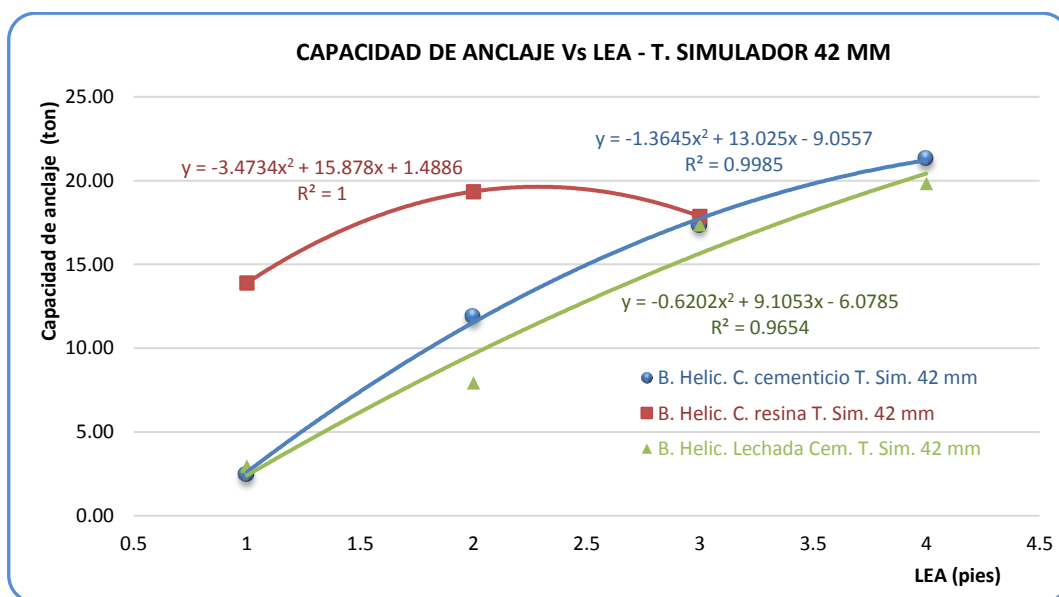
Tabla 46

*Capacidad de Anclaje de las Barras Helicoidales Instaladas con Cartuchos de Cementicio, Resina y Lechada de Cemento en Tubos Simuladores de 42 mm*

LEA (pies)	Capacidad de anclaje en tubos simuladores de 42 mm (ton)		
	B. Helic. C. Cementicio	B. Helic. C. Resina	B. Helic. L. Cemento
1	2,48	13,89	2,98
2	11,91	19,35	7,94
3	17,37	17,86	17,37
4	21,34		19,85

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la figura 193, la LEA óptima de la barra helicoidal instalada con cartuchos de resina en diámetro de tubo simulador de 42 mm, sería 2 pies; mientras que para la combinación con cartuchos de cementicio 4 pies y con lechada de cemento por encima de 4 pies de LEA.



*Figura 193. Capacidad de Anclaje de las Barras Helicoidales Instaladas en Tubos Simuladores de 42 mm con Cartuchos de Cementicio, Resina y Lechada de Cemento en Función de la LEA.*

Fuente: Elaboración propia.

**E) Capacidad de anclaje de las barras helicoidales en función de la LEA en diferentes diámetros y materiales de acoplamiento.** Como puede apreciarse en la tabla N° 47 y la figura 194, las barras helicoidales instaladas en tubos simuladores de 32,5 mm (33 mm), muestran mayor capacidad de anclaje para los 3 tipos de materiales de acoplamiento, es decir, para diámetros superiores su capacidad de anclaje está por debajo de los valores correspondientes a los de 32,5 mm. Dentro de ello, la mejor combinación es la barra helicoidal instalada con lechada de cemento.

Tabla 47

*Capacidad de Anclaje Comparativo de las Barras Helicoidales en Diferentes Diámetros y Materiales de Acoplamiento en Función de la LEA*

LEA (pies)	Capacidad de anclaje de las barras helicoidales (ton)											
	DTS* = 33 mm			DTS = 36 mm			DTS = 38 mm			DTS = 42 mm		
	BHCC	BHCR	BHLC	BHCC	BHCR	BHLC	BHCC	BHCR	BHLC	BHCC	BHCR	BHLC
1	15,88	19,85	17,37	7,94	11,91	7,19	3,97	9,92	5,62	2,48	13,89	2,98
2	20,83	21,25	22,17	9,59	16,87	7,94	11,25	11,91	7,94	11,91	19,35	7,94
3	21,00	21,00	22,00	13,89	17,37	11,25	13,89	11,91	7,94	17,37	17,86	17,37
4	21,67		21,33	13,89		11,66	13,56		11,08	21,34		19,85

\* DTS = Diámetro del tubo simulador. Fuente: Elaboración propia.

Fuente: Elaboración propia

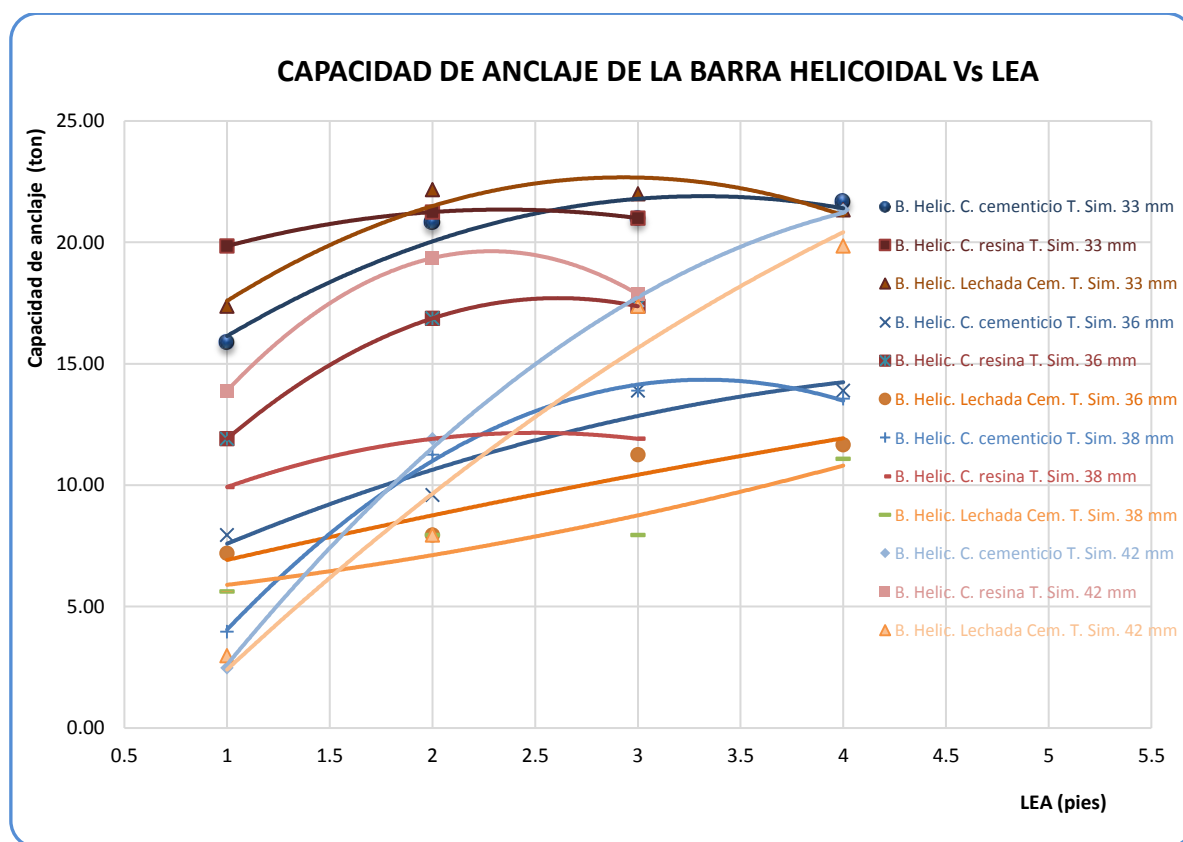


Figura 194. Capacidad de Anclaje de las Barras Helicoidales en Función de la LEA Instaladas en Diferentes Tubos Simuladores y Materiales de Acoplamiento.

Fuente: Elaboración propia.



La longitud efectiva de anclaje (LEA) ideal para las barras helicoidales instaladas con lechada de cemento en diámetro de tubo simulador de 32,5 mm (33 mm), es 2,5 pies. Para la combinación de barra helicoidal con cartuchos de cementicio en tubos simuladores de 32,5 mm y 38,3 mm, la LEA óptima es 3 pies. Las barras helicoidales instaladas con cartuchos de cementicio en 36,3 mm y 42 mm, con lechada de cemento de 36,3 mm, 38,3 mm y 42 mm; muestran la tendencia de tener mayor capacidad de anclaje más allá de 4 pies de LEA. Para el caso de la combinación barra helicoidal instalada con cartuchos de resina, la LEA óptima es de 2 pies, para todos los diámetros ensayados.

### 8.2.2 Capacidad anclaje en función del diámetro del tubo simulador.

**A) Para 1 pie de la longitud efectiva de anclaje (LEA).** Para esta LEA, además de pruebas realizadas con las barras helicoidales instaladas con cartuchos de cementicio, cartuchos de resina y lechada de cemento, se hicieron pruebas adicionales alternando los cartuchos de cementicio con los de la resina, cuyos resultados se presenta en la tabla 48 y la figura 195.

Como también se ha demostrado arriba, las barras helicoidales muestran mayor capacidad anclaje en diámetro de tubo simulador de 32,5 mm, para todos los materiales de acoplamiento. A medida que aumenta el diámetro de los tubos simuladores va disminuyendo la capacidad de anclaje, hasta un rango de diámetros, a partir del cual, asciende ligeramente.

Tabla48

*Capacidad de Anclaje de las Barras Helicoidales en Función del Diámetro del Tubo Simulador para 1 pie de LEA y Diferentes Materiales de Acoplamiento*

Diámetro interior del tubo simulador (mm)	Capacidad de anclaje para 1 pie de lea (ton)			
	BHCC	BHCR	BHLC	Barra Helicoidal con Cartuchos de Cementicio + resina.
32,50	15,88	19,85	17,37	15,88
36,30	7,94	11,91	7,19	2,98
38,30	3,97	9,92	5,62	11,91
42,00	2,48	13,89	2,98	7,44

Fuente: Elaboración propia.

Las barras helicoidales instaladas con cartuchos de resina y cartuchos de cementicio + resina muestran una capacidad de anclaje descendiente hasta 38 mm de diámetro, luego a partir de 39 mm comienza a ascender visiblemente más allá de 42 mm. Mientras que las barras helicoidales instaladas con cartuchos de cementicio y lechada de cemento, descienden hasta 41 mm, para luego a partir de 42 mm tender a ascender.

La combinación que muestra mayor capacidad de anclaje, es la barra helicoidal instalada con cartuchos de resina para todos los diámetros ensayados, seguido por la

instalada con lechada de cemento, pero hasta 36 mm, para diámetros superiores le sigue las barras helicoidales instaladas con cartucho de cementicio + cartucho de resina. En tercer lugar, se posiciona la barra helicoidal instalada con cartucho de cementicio, pero hasta un diámetro ligeramente superior a 35 mm, luego de cuyo diámetro, es superado por la instalada con cartucho de cementicio + cartucho de resina.

El comportamiento de sostenimiento de la barra helicoidal instalada con cartuchos de cementicio y lechada de cemento es muy similar, donde la capacidad anclaje con lechada de cemento es ligeramente superior, como puede apreciarse en la figura 195.

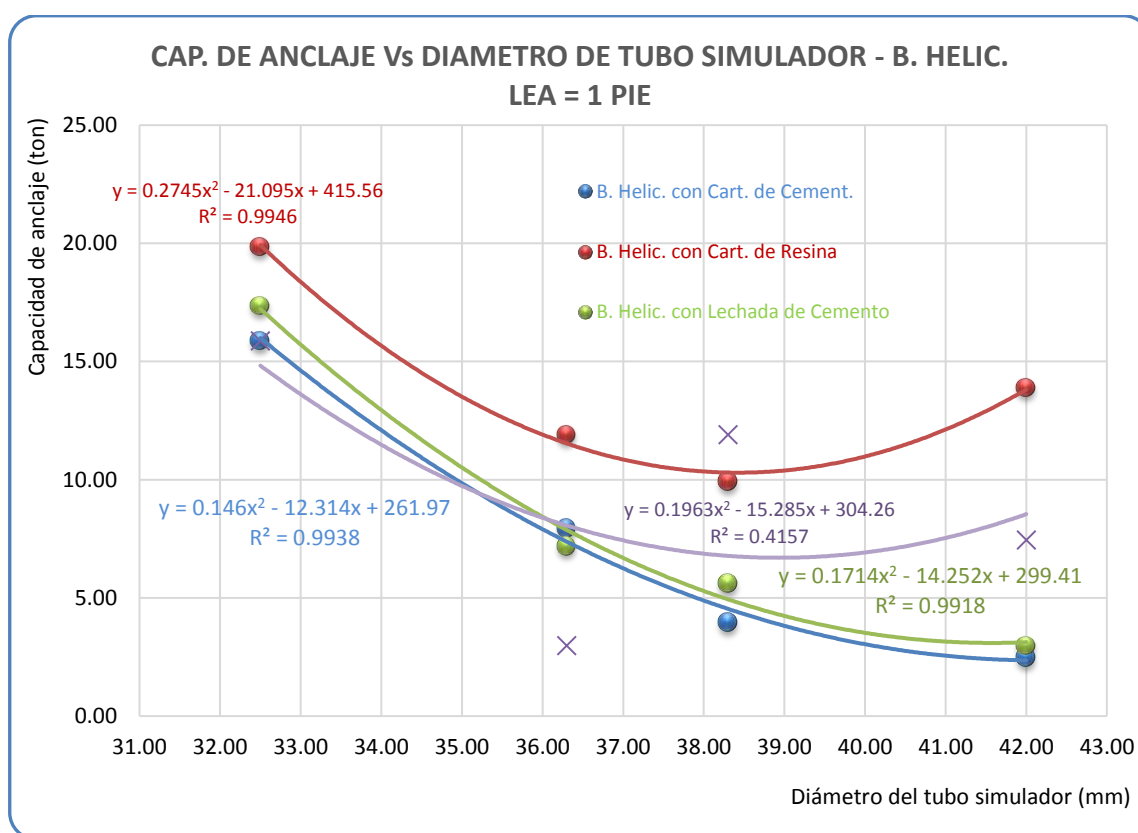


Figura 195. Capacidad de anclaje de las barras helicoidales en función del diámetro de tubo simulador para 1 pie de LEA.

Fuente: Elaboración propia.

**B) Para 2 pies de la longitud efectiva de anclaje.** Para esta LEA también se vuelve a repetir la misma situación que para 1 pie de LEA, es decir, la capacidad anclaje de las barras helicoidales desciende como aumenta el diámetro del tubo simulador, como muestran la tabla 49 y la figura 196. Las barras helicoidales muestran mayor capacidad de anclaje para 32,5 mm de diámetro de tubo simulador para los 3 materiales de acoplamiento utilizados.

Tabla 49

*Capacidad de Anclaje de las Barras Helicoidales en Función del Diámetro del Tubo Simulador para 2 pies de LEA y Diferentes Materiales de Acoplamiento*

Diámetro interior del tubo simulador (mm)	Capacidad de anclaje para LEA = 2 pies (ton)		
	Barra Helicoidal con Cartucho de Cementicio	Barra Helicoidal con Cartucho de Resina	Barra Helicoidal con Lechada de Cemento
32,50	20,83	21,25	22,17
36,30	9,59	16,87	7,94
38,30	11,25	11,91	7,94
42,00	11,91	19,35	7,94

Fuente: Elaboración propia.

La combinación que arroja mayor capacidad de anclaje es la barra helicoidal instalada con cartuchos de resina, capacidad que desciende como aumenta el diámetro hasta 37 mm y a partir de 38,5 mm comienza ascender visiblemente más allá de 42 mm. La combinación barra helicoidal con lechada de cemento, muestra mayor caída de la capacidad de anclaje, puesto que de 22,17 ton de capacidad que tenía para 32,5 mm, cae a 7 ton aproximadamente para 39 mm de diámetro de tubo simulador. La capacidad de anclaje de las barras helicoidales instaladas con cartuchos de cementicio se ubica entre las correspondientes a las instaladas con cartuchos de resina y lechada de cemento.

Para la alternativa barra helicoidal instalada con cartuchos de resina, su capacidad de anclaje desciende hasta el diámetro de 37 mm, para luego recuperarse a partir de 39 mm hasta más allá de 42 mm como evidencia la figura 196, es decir, una capacidad de anclaje superior a 19,35 ton. En el caso de la barra helicoidal instalada con cartuchos de cementicio, su capacidad de anclaje desciende hasta 38,5 mm de diámetro de tubo simulador, luego del cual, comienza a recuperarse hasta alcanzar 11,91 ton de capacidad de anclaje. Para la combinación barra helicoidal con lechada de cemento, su capacidad de anclaje desciende hasta 39 mm de diámetro de tubo simulador, para luego recuperarse ligeramente hasta más allá de 42 mm.

**C) Para 3 pies de la longitud efectiva de anclaje.** Análogo a los casos anteriores, aquí también se repite que, la capacidad de anclaje de las barras helicoidales se muestra alta para 32,5 mm de diámetro para los tres materiales de acoplamiento, 21,0 ton para cartuchos de cementicio y lechada de cemento, y, 21,25 ton para cartuchos de resina. Al incrementarse el diámetro las capacidades de anclaje descienden hasta 37,5 mm, luego del cual comienza ascender hasta más allá de 42 mm como puede apreciarse en la tabla 50 y la figura 197.

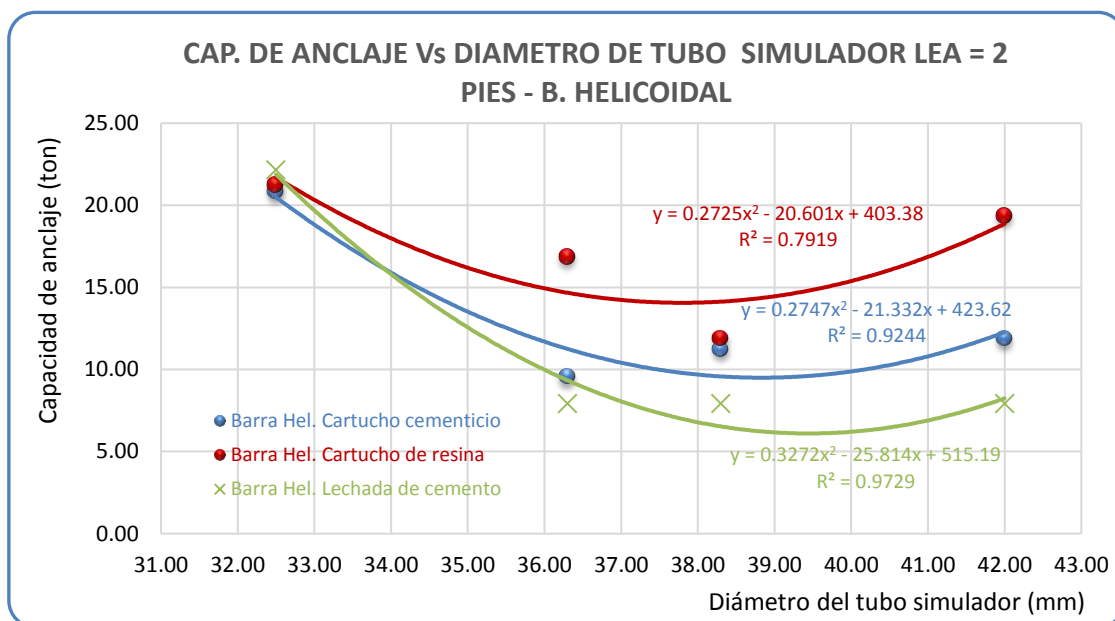


Figura 196. Capacidad de Anclaje de las Barras Helicoidales en Función del Diámetro del Tubo Simulador para 2 pies de LEA.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla50

Capacidad de Anclaje de las Barras Helicoidales en Función del Diámetro de Tubo Simulador para 3 pies de LEA y Diferentes Materiales de Acoplamiento

Diámetro interior del tubo simulador (mm)	Capacidad de anclaje para LEA = 3 PIES (ton)		
	Barra Helicoidal con Cartucho de Cementicio	Barra Helicoidal con Cartucho de Resina	Barra Helicoidal con Lechada de Cemento
32,50	21,00	21,25	21,00
36,30	13,89	16,87	17,37
38,30	13,89	11,91	10,92
42,00	17,37	19,35	17,86

Fuente: Elaboración propia.

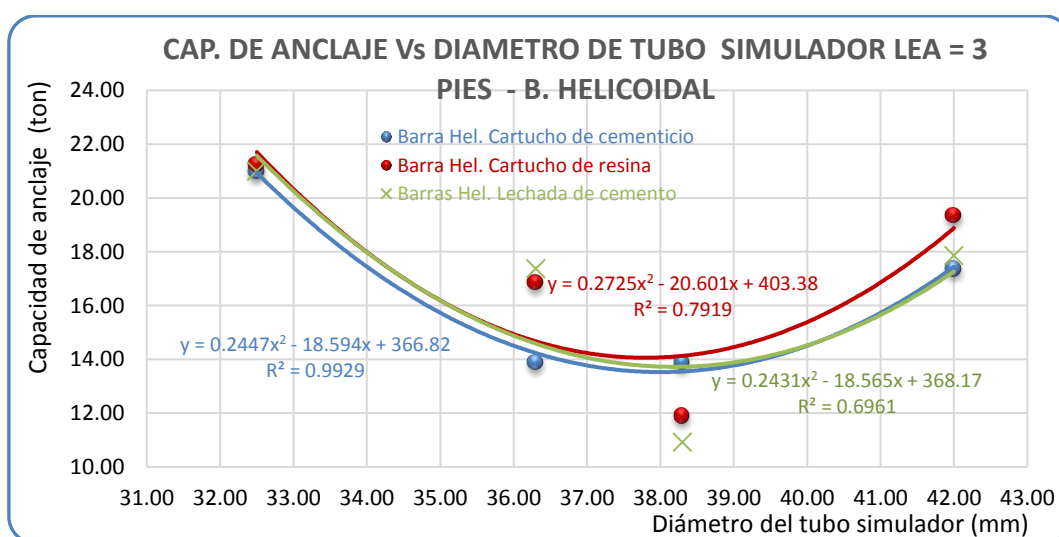


Figura 197. Capacidad de Anclaje de las Barras Helicoidales en Función del Diámetro del Tubo Simulador para 3 pies de LEA.

Fuente: Elaboración propia.

Para 3 pies de LEA, la mayor capacidad de anclaje muestra la barra helicoidal instalada con cartuchos de resina, aunque con valores muy cercanos que, para las otras combinaciones, sobre todo en comparación con la lechada de cemento. El valor más bajo corresponde a la barra helicoidal instalada con cartuchos de cementicio.

**D) Para 4 pies de la longitud efectiva de anclaje.** Como se ha indicado anteriormente, las pruebas con 4 pies de LEA, solo se desarrollaron con cartuchos de cementicio y lechada de cemento, por haberse presentado dificultad en la instalación con cartuchos de resina para esta longitud. Como ilustran la tabla 51 y la figura 198, el comportamiento de anclaje de las barras helicoidales, es similar a los casos precedentes, es decir, a medida que aumenta el diámetro de tubo simulador partiendo de 32,5 mm, la capacidad de anclaje disminuye hasta 37,5 mm, a partir del cual, al seguir aumentando el diámetro comienza crecer la capacidad de anclaje hasta valores muy similares a los iniciales hasta alcanzar los 42 mm. Como puede apreciarse en la figura 198, la combinación barra helicoidal - cartucho de cementicio es la que muestra mayor capacidad de anclaje, pero por estrecho margen.

Tabla 51

*Capacidad de Anclaje de las Barras Helicoidales en Función del Diámetro del Tubo Simulador para 4 pies de LEA y Diferentes Materiales de Acoplamiento*

Diámetro interior del tubo simulador (mm)	Capacidad de anclaje para LEA = 4 pies (ton)	
	Barra Helicoidal con Cartucho de Cementicio	Barra Helicoidal con Lechada de Cemento
32,5	21,67	21,33
36,30	13,89	11,66
38,30	17,37	17,37
42,00	21,34	19,85

Fuente: Elaboración propia.

**E) Capacidad de anclaje de las barras helicoidales en función del diámetro de tubo simulador para diferentes LEAs.** Analizando en forma conjunta las capacidades de anclaje de las barras helicoidales instaladas con cartuchos de cementicio, cartuchos de resina y lechada de cemento; la combinación que demuestra tener mayor capacidad de anclaje, es la barra helicoidal instalada con cartuchos de cementicio con 4 pies de LEA y la más baja, para 1 pie de LEA y el mismo material de acoplamiento, como puede verificarse en la tabla 52 y la figura 199.

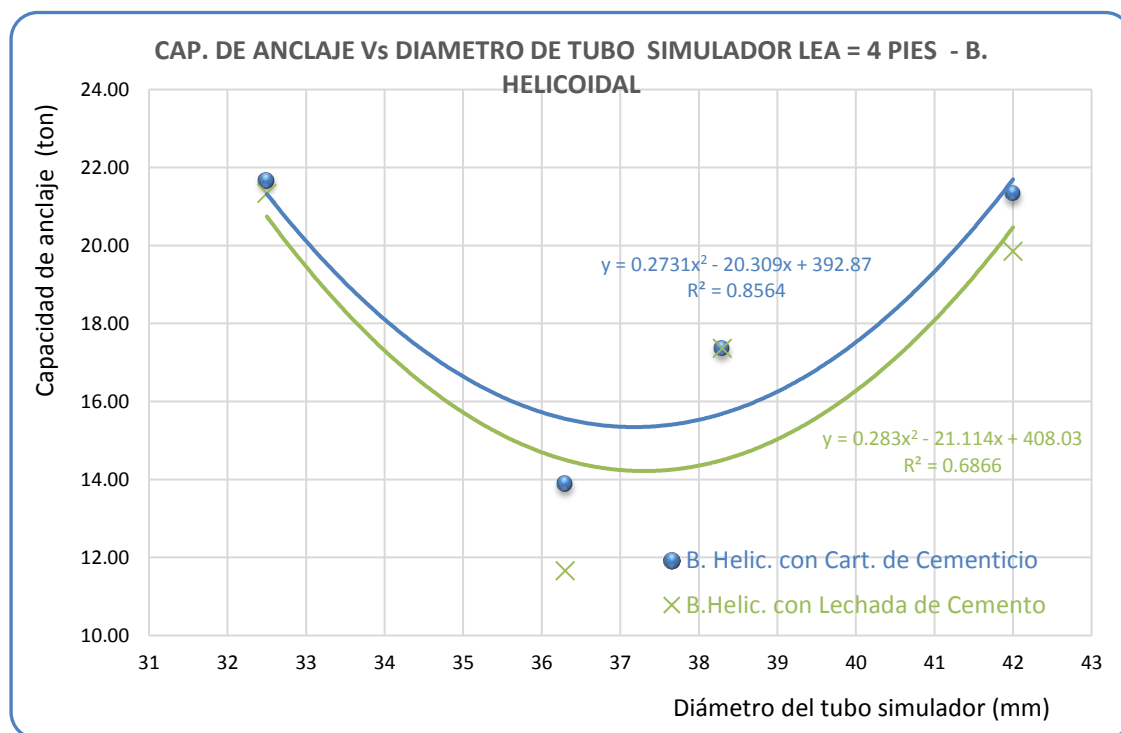


Figura 198. Capacidad de anclaje de las barras helicoidales en función del diámetro del tubo simulador para 4 pies de LEA

Fuente: Elaboración propia.

Para todos los materiales de acoplamiento y todas las LEAs, la mayor capacidad de anclaje se alcanza para 32,5 mm de diámetro de tubo simulador (con tendencia a valores superiores para diámetros menores, ejemplo 32 mm), como puede observarse en la figura 199. En diámetros superiores, a partir del diámetro anterior, su capacidad descende, hasta diámetros entre 36,5 y 38,5 mm; para luego volver a ascender, visiblemente hasta más allá de 42 mm. Sin embargo, económicamente conviene instalar en diámetros más pequeños, por el costo de perforación y consumo de material de acoplamiento. Por consiguiente, el diámetro más adecuado para instalar las barras helicoidales con cualquier material de acoplamiento, está entre 32 y 33 mm.

Tabla 52

Capacidad de Anclaje de las Barras Helicoidales en Función del Diámetro del Tubo Simulador para Diferentes Materiales de Acoplamiento

Diámetro de tubo simulador (mm)	Capacidad de anclaje de las barras helicoidales Vs diametro de tubo simulador (ton)										
	LEA = 1 PIE			LEA = 2 PIES			LEA = 3 PIES			LEA = 4 PIES	
	BHCC	BHCR	BHLC	BHCC	BHCR	BHLC	BHCC	BHCR	BHLC	BHCC	BHLC
32.50	15.88	19.85	17.37	20.83	21.25	22.17	21.00	21.00	21.00	21.67	21.33
36.30	7.94	11.91	7.19	9.59	16.87	7.94	13.89	17.37	17.37	13.89	11.66
38.30	3.97	9.92	5.62	11.25	11.91	7.94	13.89	10.92	10.92	17.37	15.23
42.00	2.48	13.89	2.98	11.91	19.35	7.94	17.86	19.35	17.86	21.34	19.85

Fuente: Elaboración propia.



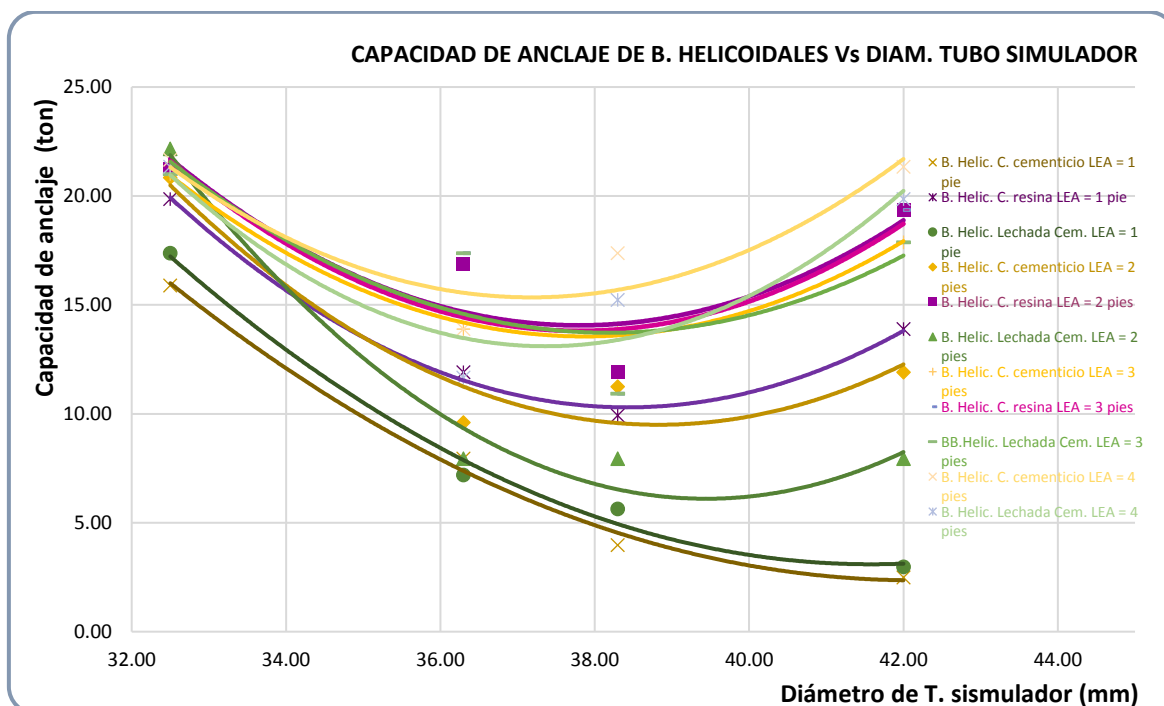


Figura 199. Capacidad de anclaje de las barras helicoidales en función del diámetro del tubo simulador para diferentes LEAs y diferentes materiales de acoplamiento.

Fuente: Elaboración propia.

**8.2.3 Discusión de la posición de la barra helicoidal y propiedades del material de acoplamiento fraguado.** Para proceder con los análisis de centrado y propiedades de la combinación de las barras helicoidales con los tres tipos de materiales de acoplamiento utilizados (cartuchos de cementicio, cartuchos de resina y lechada de cemento), como se ha detallado en los capítulos correspondientes, se seccionaron muestras de pernos instalados y se prepararon probetas para las pruebas correspondientes.

**A) Posición de las barras helicoidales instaladas dentro de los tubos simuladores.** Como se ha indicado en el capítulo anterior, primero se definió 4 posiciones de la barra helicoidal dentro de los tubos simuladores: Centrado, ligeramente descentrado, descentrado y muy descentrado.

Como este análisis se hizo en ambos extremos de cada segmento de los pernos seccionados; en ciertos segmentos, se pudo observar la posición centrada de la barra helicoidal. Sin embargo, ello es únicamente por la coincidencia del corte; dado que en ningún caso, el perno se presenta centrado para ningún diámetro de tubo simulador y mortero, tal como ilustra como ejemplo la figura 200; donde las 4 muestras del margen superior izquierdo corresponden a las barras helicoidales instaladas con cartuchos de cementicio (CC), las 4 del margen superior derecho son las barras helicoidales instaladas con cartuchos de resina (CR) y las 4 de abajo las instaladas con lechada de cemento (LC).



*Figura 200.* Barras Helicoidales Seccionadas para Analizar su Centrado en Distintos Tipos de Materiales y Diámetros

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 53, presenta en resumen la posición adoptada por las barras helicoidales en cada segmento del perno (del 0 al 4, visto de la cabeza a la cola) instaladas en los 3 tipos de materiales de acoplamiento (cartuchos de cementicio y resina, y lechada de cemento), en ningún segmento se observa la barra helicoidal centrado en el tubo. Su posición va de descentrado a muy descentrado. Asimismo, observando los pernos en sus extremos, se verifica una vez más que el acomodo de la barra durante la instalación está entre descentrado y muy descentrado. Para saber en cuanto afecta el descentrado de la barra a su capacidad de anclaje, sería pertinente realizar un estudio, utilizando un centrador de perno durante su instalación dentro de y haciendo pruebas con barras instaladas en distintas posiciones respecto al eje del tubo simulador.

Tabla 53

*Análisis de la Posición de la Barra Helicoidal en Cada Tipo de Material de Acoplamiento en Diferentes Diámetros y Segmentos*

Material de acoplamiento.	Código de muestra	Posición de la barra helicoidal				
		0	1	2	3	4
Cartucho de cementicio	BHCC - 33 - 4 - 1	Descentrado	Muy Descentrado	descentrado		Muy descentrado, barra pegado a la pared del tubo
	BHCC - 36 - 4 - 1	Descentrado	Ligeramente descentrado	descentrado	Ligeramente descentrado	Ligeramente descentrado
	BHCC - 38 - 4 - 3	Descentrado	Descentrado	Ligeramente descentrado	muy descentrado	Ligeramente descentrado
	BHCC - 40 - 4 - 3	Descentrado	Ligeramente descentrado	Ligeramente descentrado	Ligeramente descentrado	Ligeramente descentrado
Cartucho de resina	BHLC - 33 - 4 - 1	Muy descentrado	Muy Descentrado	descentrado	Muy descentrado, barra pegado a la pared del tubo	
	BHLC - 36 - 4 - 1	Descentrado	Ligeramente descentrado	Ligeramente descentrado	Descentrado	
	BHLC - 38 - 4 - 1					
	BHLC - 40 - 4 - 2	Centrado	Ligeramente descentrado	Descentrado	Muy descentrado	Muy descentrado
Lechada de cemento	BHLC - 33 - 4 - 1	Muy descentrado	Muy Descentrado	Muy Descentrado	descentrado	descentrado
	BHLC - 36 - 4 - 1	Descentrado	Descentrado	Ligeramente descentrado	Centrado	Centrado
	BHLC - 38 - 4 - 1	Descentrado	Ligeramente descentrado	Descentrado	descentrado	Muy descentrado
	BHLC - 40 - 4 - 2	Descentrado	Muy Descentrado	Muy Descentrado	Descentrado	Muy descentrado

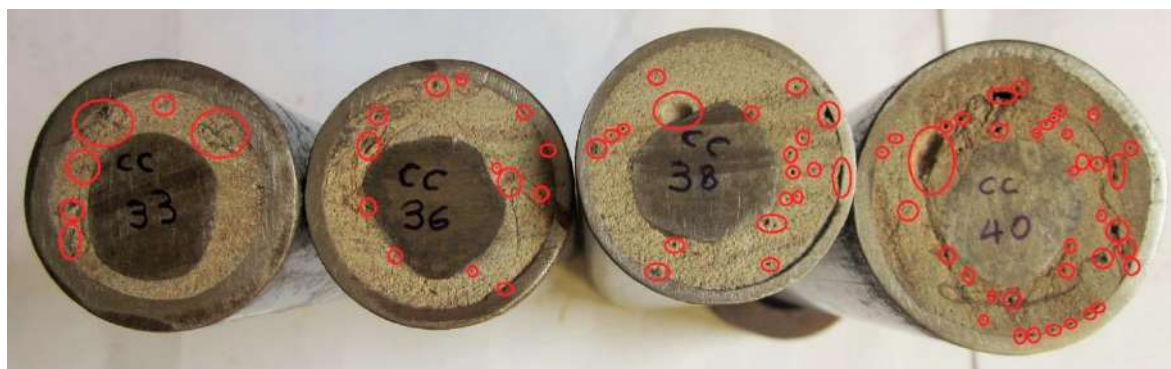
Fuente: Elaboración propia.

#### **A) Propiedades del material de acoplamiento fraguado.**

i) *Porosidad.* Para el análisis de la porosidad, se prepararon probetas con corte transversal y longitudinal, como se ha detallado en los capítulos anteriores. La figura 201 (a), ilustra los poros visibles observados en corte transversal de las barras helicoidales instaladas con cartucho de cementicio, donde se puede observar que la porosidad aumenta como aumenta el diámetro del tubo simulador. Como se ha ilustrado en los capítulos anteriores, en las probetas seccionadas longitudinalmente, se observa que el mortero se presenta completamente poroso, sobre todo en el contacto con la pared del tubo simulador, afectando la adherencia del cementicio y por consiguiente, la capacidad de anclaje de las barras helicoidales.

La figura 201 (b) corresponde a la porosidad observada en sección transversal de las barras helicoidales instaladas con cartuchos de resina en los diferentes diámetros estudiados, donde se constata que en diámetros de 36,3 y 42 mm de diámetro de tubo simulador, presenta mayor porosidad, siendo más poroso en 42 mm. Al igual que en la combinación anterior, se concluye que la porosidad es más intensa en el contacto de la resina con las paredes de los tubos simuladores. También aquí, se puede destacar la facilidad de su desprendimiento del

tubo por efecto de la porosidad, es decir, afecta la adherencia y consecuentemente su la capacidad de anclaje de las barras helicoidales instaladas con resina.



(a)



(b)



(c)

*Figura 201. Porosidad de los Materiales de Acoplamiento de las Barras Helicoidales. (a) Cartuchos de Cementicio. (b) Cartuchos de Resina. (c) Lechada de Cemento*

Fuente: Elaboración propia.

La figura 201 (c), Corresponde a la porosidad mostrada por la lechada de cemento en diferentes diámetros de tubo simulador en corte transversal, se aprecia que la lechada de cemento se presenta más porosa en diámetros de 36,3 y 38,3 mm. Asimismo, en probetas seccionadas longitudinalmente, se nota bastante porosa sobre todo en el contacto de las paredes de los tubos simuladores, siendo su efecto el fácil desprendimiento menguando su adherencia, que compromete la capacidad de anclaje de las barras helicoidales instaladas con este material de acoplamiento.

La tabla 54, muestra en resumen la porosidad mostrada por las probetas en corte transversal de los tres tipos de materiales de acoplamiento en diferentes tubos simuladores. El material que muestra mayor porosidad es la lechada de cemento, seguido por los cartuchos de cementicio. Cabe destacar que el número de poros consignados en esta tabla corresponden a los poros visibles con una lupa de mano corriente, es decir, no se está tomando en cuenta los microporos que de hecho se generan. Asimismo, el tamaño de los poros visibles es muy variados van de 0,5 a 6 mm, inclusive en algunos casos se pudo observar oquedades alargados y profundos.

En las probetas seccionadas longitudinalmente, se observa que la tendencia de formarse la mayor cantidad de burbujas es en contacto con las paredes interiores de los tubos simuladores y en menor proporción en el contacto con las barras helicoidales.

ii) *Acoplamiento y adherencia.* En general cuando se instalan los pernos en tubos simuladores o talados, tanto el acoplamiento como la adherencia no son perfectas. En caso de los pernos inflables (Hydrabolt, X-Pandabolt, Swellex, etc.) y los Split Sets, se generan franjas de aberturas que no hacen contacto con la pared del tubo simulador, además de los pliegues y/o ranuras de fabricación.

La figura 202, presenta el acoplamiento de los pernos Hydrabolt (parte superior) y X-Pandabolt (parte inferior) instalados en tubos simuladores 29,74 mm (30 mm, también usado como tubo de estrangulamiento); 32,5 mm (33 mm); 36,3 mm (36 mm); 38,3 mm (38 mm) y 40,96 mm (40 mm). En esta secuencia, además de las aberturas que se generan, se observan las diversas formas y el área de contacto que se generan debido al pliegue de fabricación.

Las Aberturas generadas y la superficie sin contacto debido al pliegue, reducen la superficie de contacto que influye en su capacidad de anclaje. Así como puede observarse en la tabla 55, el área de contacto aumenta como aumenta el diámetro del tubo simulador para ambos pernos, sin embargo, para todos los diámetros, mayores áreas de contacto muestran los Hydrabolt, diferencia que también puede visualizarse en la figura 203. Cabe destacar que las áreas de contacto porcentuales, se han calculado en base al diámetro original del tubo del se fabrican estos pernos (42,72 mm).

Tabla 54

*Número de poros en el Material de Acoplamiento de las Barras Helicoidales Observados en el Corte de los Segmentos de Muestras*

Material de acomplam.	Código de muestra	Porosidad del material de acoplamiento				
		0	1	2	3	4
Cartucho de cementicio	BHCC - 33 - 4 - 1	10 burbujas de 0,5 á 4,5 mm, se observa bastante poroso	7 burbujas de 0,5 á 2 mm,	4 burbujas de 1,8 á 6 mm	16 burbujas de 0,6 á 2,27 mm	
	BHCC - 36 - 4 - 1	7 burbujas de 0,76 á 4 mm	2 burbujas de 4 mm	2 burbujas de 1,67 mm	2 burbujas de 0,6 mm y 2 de 2,5 mm	3 burbujas de 1 á 2 mm
	BHCC - 38 - 4 - 3	9 burbujas de 0,5 á 1,14 mm	15 burbujas de 0,4 á 4 mm	25 burbujas de 0,19 á 2,5 mm	10 burbujas de 0,2 á 0,92 mm.	12 burbujas de 0,5 á 1,0 mm
	BHCC - 40 - 4 - 3	10 burbujas de 0,5 á 2 mm, se observa bastante poroso	16 burbujas de 1 a 2 mm	12 burbujas de 0,5 á 2 mm	4 burbujas de 0,6 á 4 mm	10 burbujas de 0,5 á 2 mm y 1 oquedad 2,8 x 13,3 x 4,7 mm
Cartucho de resina	BHLC - 33 - 4 - 1	Se notan 10 poros pequeños	7 burbujas de 0,5 á 2 mm,	4 burbujas de 1,8 á 6 mm	16 burbujas de 0,6 á 2,27 mm	
	BHLC - 36 - 4 - 1	7 burbujas de 0,76 á 4 mm	2 burbujas de 4 mm	2 burbujas de 1,67 mm	Un conjunto de pequeñas burbujas	
	BHLC - 38 - 4 - 1	6 burbujas de 0,5 á 1,6 mm				
	BHLC - 40 - 4 - 2	Se nota muy alterado	12 burbujas de diámetro menor a 0,5 mm	7 burbujas de 2 mm y de 0,8 mm	6 burbujas de 0,5 mm	Cavidades alargadas junto a la pared del tubo y barra helicoidal
Lechada de cemento	BHLC - 33 - 4 - 1	14 poros de 1,33 á 1,82 mm	18 burbujas de 0,4 á 1,2 mm	11 burbujas de 0,3 á 1,1 mm	13 burbujas de 0,5 á 1,05 mm	17 burbujas de 0,3 á 1,3 mm
	BHLC - 36 - 4 - 1	8 burbujas de 0,5 á 1,50 mm y 1 de 3,6 mm	13 burbujas de 0,5 á 1,7 mm y 1 de 6,1 mm	12 burbujas de 0,4 á 1,2 mm	9 burbujas de 0,4 á 1,0 mm	18 burbujas de 0,3 á 1,7 mm
	BHLC - 38 - 4 - 1	6 burbujas de 0,5 á 2,1 mm	9 Burbujas de 0,4 á 1,8 mm y 1 de 6,2 mm	15 burbujas de 0,6 á 1,3 mm y 1 de 5,2 mm	8 burbujas de 0,6 á 1,6 mm y una cavidad (cangrejera) de 24 x 10 x 10,5 mm de profundidad	14 burbuja de 0,4 á 0,8 mm, 1 de 1,7 y 1 de 3,9 mm
	BHLC - 40 - 4 - 2	12 burbujas de 0,3 á 1,1 mm	16 burbujas de 0,5 á 1,5 mm	13 burbuja de 0,4 á 1,1 mm y 3 de 1,5 á 2,8 mm	4 burbujas de 0,4 á 0,8 mm y 3 de 1,8 á 3,3 mm	21 burbujas de 0,5 á 1,8 mm

Fuente: Elaboración propia.

En el caso de los Split Sets, los tamaños de las franjas de aberturas que se generan, entre las paredes del tubo simulador y del propio perno, aumentan como aumenta el diámetro del tubo simulador. Como puede observarse en la parte superior de la figura N° 204, correspondiente al Split Set instalado en tubo simulador de 38,3 mm (39 mm), el 85,87 % de su pared exterior queda sin hacer contacto debido a la ranura (14,6 mm) y generación de 2 grandes aberturas, una de 44,09 mm y otra de 47,45 mm; como pude observarse en la tabla 56.





Figura 202. Acoplamiento de los Pernos Hydrabolt y X-Pandabolt en las Paredes de los Tubos Simuladores  
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 55

Áreas con o sin Contacto en los Pernos Hydrabolt y Swellex (X-Pandabolt) en Diferentes Diámetros de Tubo Simulador

Diámetro del tubo simulador (mm)	Áreas con o sin contacto (%)					
	Hydrabolt			Swellex (X-Pandabolt)		
	Área de contacto (%)	Área sin contacto (%)	Área sin contacto debido al pliegue (%)	Área de contacto (%)	Área sin contacto (%)	Área sin contacto debido al pliegue (%)
32,5	46,86	53,14	12,28	41,68	58,32	12,69
36,56	46,56	53,44	13,62	47,81	52,19	16,13
38,53	55,82	44,18	13,31	47,54	52,46	14,95
40,96	60,93	39,07	16,85	51,96	48,04	13,98

Fuente: Elaboración propia.

Las áreas de contacto porcentuales (en función de la pared exterior del Split Set) resumidos en la tabla 57, disminuyen de acuerdo al tamaño del tubo simulador, tal es así que, para 37,3; 38,14 y 38,3 mm de diámetro de tubo simulador, las áreas de contacto de contacto son respectivamente, 45,31 %; 44,31 % y 14,13 %.

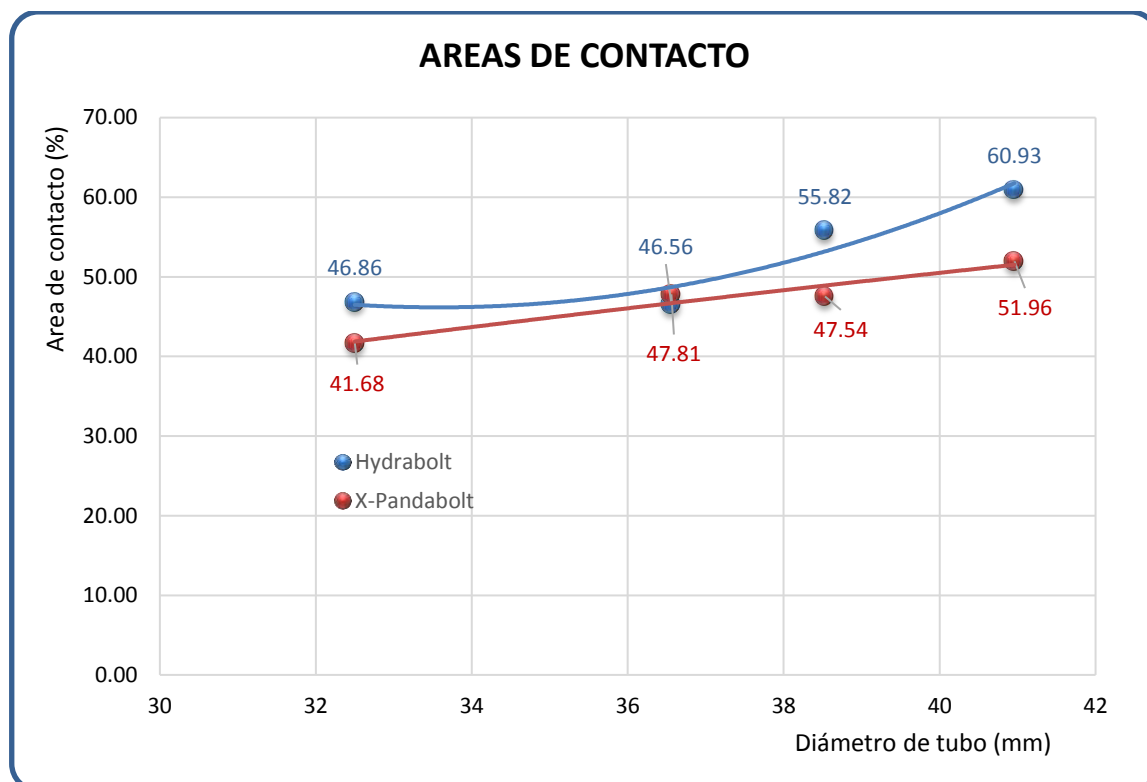


Figura 203. Areas de Contacto Porcentuales de los Pernos Hydrabolt y Swellex (X-Pandabolt) con las paredes de los tubos simuladores

Fuente: Elaboración propia.



Figura 204. Acoplamiento de los Split Sets en Diferentes Tubos Simuladores

Fuente: Elaboración propia.

Tabla56

*Dimensiones de las Aberturas en los Split Sets instalados en Diferentes Tubos Simuladores*

Diámetro del tubo simulador (mm)	Dimensiones de las aberturas en los Split Sets (mm)				Abertura de la ranura (mm)
	1	2	3	4	
37,3	9,53	24,91	12,06	11,30	10,18
38,14	8,97	14,42	23,96	13,70	12,99
38,3	44,09	47,45			14,60

Fuente: Elaboración propia.

Las barras helicoidales, no trabajan solas, requieren de un material cementante que la englobe y se acople a la pared del tubo simulador (taladro), el análisis de acoplamiento y adherencia, se hicieron en los cortes transversales y longitudinales de las muestras, y la prueba de Charpy en probetas adecuadamente preparados para este fin. Por consiguiente, la adherencia del mortero tanto en la propia barra como en la pared del tubo simulador (taladro), define su capacidad de anclaje y está afectada por una serie de factores, como la porosidad del mortero, superficies oxidadas de la barra helicoidal y la pared del tubo simulador, presencia de los envoltorios en caso de los morteros encartuchados.

Tabla57

*Áreas con o sin Contacto de los Split Sets con las Paredes del Tubo Simulador*

Diámetro del tubo simulador (mm)	Área de contacto (%)	Área sin contacto (%)	Área sin contacto debido la ranura (%)
37,3	45,31	54,69	9,37
38,14	44,31	55,69	11,88
38,3	14,13	85,87	13,46

Fuente: Elaboración propia.

El mortero que muestra mejor acoplamiento es la lechada de cemento a lo largo del tubo simulador, puesto que en los casos de los cartuchos de cementicio y resina, el envoltorio plástico impide un buen acoplamiento, sobre todo hacia el fondo de los tubos simuladores donde tienden acumularse los envoltorios plásticos, impidiendo el acoplamiento del mortero y reduciendo su adherencia, la tabla 58 muestra en resumen el acoplamiento de los morteros en diferentes diámetros de tubo simulador en cortes transversales de las muestras. Sin embargo, sin la presencia de los envoltorios plásticos, el mortero que muestra mejor adherencia es la resina, tal como se verificó con los ensayos de Charpy.

Tabla58

*Calidad de Acoplamiento de los Morteros de las Barras Helicoidales en Diferentes Diámetros de los Tubos Simuladores*

Material de acoplamiento	Código de muestra	Acoplamiento del material cementante				
		0	1	2	3	4
Cartucho de cementicio	BHCC - 33 - 4 - 1	Bueno tanto en la barra como en la pared del tubo	Bueno, pero con presencia de envoltorio plástico	bueno		Bueno
	BHCC - 36 - 4 - 1	Bueno tanto en la barra como en la pared del tubo	Bueno	bueno	bueno	Bueno
	BHCC - 38 - 4 - 3	Bueno tanto en la barra como en la pared del tubo	Bueno	bueno	bueno	Bueno
	BHCC - 40 - 4 - 3	Bueno tanto en la barra como en la pared del tubo	Bueno tanto en la barra como en la pared del tubo	Bueno tanto en la barra como en la pared del tubo	Bueno tanto en la barra como en la pared del tubo	Bueno tanto en la barra como en la pared del tubo
Cartucho de resina	BHCR - 33 - 3 - 1	Bueno tanto en la barra como en la pared del tubo	Bueno, pero con presencia de envoltorio plástico	bueno		Bueno
	BHCR - 36 - 3 - 1	Bueno tanto en la barra como en la pared del tubo	Bueno	Bueno. Se observa grieta en el contacto barra - resina		Bien hacia la barra y pequeña grieta hacia el tubo.
	BHCR - 38 - 2 - 2	Bueno tanto en la barra como en la pared del tubo				
	BHCR - 40 - 3 - 3	pobre	Bueno tanto en la barra como en la pared del tubo	Bueno tanto en la barra como en la pared del tubo	Bueno tanto en la barra como en la pared del tubo	Regular
Lechada de cemento	BHLC - 33 - 4 - 1	Bueno tanto en la barra como en la pared del tubo	Bueno tanto en la barra como en la pared del tubo	Bueno tanto en la barra como en la pared del tubo	Bueno tanto en la barra como en la pared del tubo	Bueno tanto en la barra como en la pared del tubo
	BHLC - 36 - 4 - 1	Bueno tanto en la barra como en la pared del tubo	Bueno tanto en la barra como en la pared del tubo	Bueno tanto en la barra como en la pared del tubo	Bueno tanto en la barra como en la pared del tubo	Bueno tanto en la barra como en la pared del tubo
	BHLC - 38 - 4 - 1	Bueno tanto en la barra como en la pared del tubo	Bueno tanto en la barra como en la pared del tubo	Bueno tanto en la barra como en la pared del tubo	Bueno tanto en la barra como en la pared del tubo	Bueno tanto en la barra como en la pared del tubo
	BHLC - 40 - 4 - 2	Bueno tanto en la barra como en la pared del tubo	Bueno tanto en la barra como en la pared del tubo	Bueno tanto en la barra como en la pared del tubo	Bueno tanto en la barra como en la pared del tubo	Bueno tanto en la barra como en la pared del tubo

Fuente: Elaboración propia.

iii) *presencia del envoltorio plástico*. La presencia de envoltorios plásticos, es propia de los morteros encartuchados, en el presente caso, los cartuchos de cementicio y de resina. En la figura 205 (a), se puede observar que los envoltorios plásticos de los cartuchos de

cementicio, adquieren diferentes formas y posiciones al ser englobados en la masa del cementicio (en la figura aparecen encerrados con líneas rojas), en los diferentes diámetros de tubos simuladores; cabe destacar que esta figura corresponde a las muestras seccionadas transversalmente. Asimismo, la figura 205 (b) corresponde a las muestras de barras helicoidales instaladas con cartuchos de resina, donde al igual que en los casos anteriores, el envoltorio plástico adquiere distintas formas y posiciones, vistos en cortes transversales.



(a)



(b)

*Figura 205.* Presencia de Envoltorios Plásticos de los Materiales de Acoplamiento Cuando se Instalan las Barras Helicoidales. (a) Barras Helicoidales con Cartuchos de Cementicio. (b) Barras Helicoidales con Cartuchos de Resina.

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 59, presenta en resumen la presencia de los envoltorios plásticos en cortes transversales de los testigos (de 0 a 4), tanto de las barras helicoidales instaladas con cartuchos de cementicio como con cartuchos de resina. Como puede apreciarse, este análisis se hizo para cada diámetro de tubo simulador ensayado, en la mayoría de los casos, los envoltorios quedan completamente plegados y englobados en la masa del mortero, pegados a las paredes de los tubos simuladores o envolviendo a la barra helicoidal. Asimismo, se observa que los envoltorios tienden acumularse en el fondo de los tubos simuladores (taladros), durante la instalación por rotación y percusión.

Tabla 59

*Presencia de Envoltorios Plásticos de los cartuchos de Cementicio y Resina, Observados en Diferentes Segmentos de Muestras y Diámetros*

Mortero	Código de muestra	Presencia de envoltorio plástico					Observac.
		0	1	2	3	4	
Cartucho de cementicio	BHCC-33-4-1	No notable	A un lado de la barra cubriendo la mitad de la pared del tubo	Envoltorio a la vista, pegado a la pared del tubo.		No	Envoltorio de plástico de 0,06 mm de espesor. Es una manga de plástico que plegado tiene un ancho de 44,79 mm y desplegado 89,58 mm. Configura una manga de 28,52 mm de diámetro
	BHCC-36-4-1	No notable	No se nota	No se nota	Completam. plegado	no se nota	
	BHCC-38-4-3	No se nota	No se nota	No se nota	No se nota	no se nota	
	BHCC-40-4-3	Completamente plegado	Completamente plegado hacia un lado	Englobado en distintas partes del cementicio	Alrededor de la barra completam. plegada.	Completamente plegado alrededor de la barra	
Cartucho de resina	BHCR-33-3-1	No apreciable	A un lado de la barra cubriendo la mitad de la pared del tubo	Envoltorio pegado a la pared del tubo.	No		Envoltorio de plástico de 0,04 mm de espesor. Es una manga de plástico que desplegado tiene un ancho de 84,87 mm. Configura una manga de 27,015 mm de diámetro, con un diafragma en su interior que separa los componentes "A" y "B" de la resina.
	BHCR-36-3-1	No apreciable	Incluido en gran parte de la resina y completamente plegado	Envoltorio plegado al costado de la barra	Acumulación de envoltorio		
	BHCR-38-2-2	No apreciable					
	BHCR-40-3-3	No apreciable	plegado alrededor de la barra	Plegado a un lado de la barra	Plegado en distintas partes de la masa de la resina	Acumulación de envoltorio plegado	

Fuente: Elaboración propia.

Cabe destacar que, si bien el espesor del envoltorio plástico de los cartuchos de cementicio (0,06 mm) es ligeramente superior al de los cartuchos de resina (0,04 mm), este último es rígido que afecta aún más la adherencia del mortero en la pared de los tubos simuladores (taladros). La figura 206, muestra el acoplamiento y adherencia de la resina, donde la figura 206 (a) ilustra el envoltorio plástico enroscado en la barra helicoidal, limitando su acoplamiento y adherencia; la figura 206 (b) muestra como el envoltorio plástico afecta el acoplamiento y adherencia de la resina en la pared del tubo simulador (taladro).





(a)



(b)

*Figura 206. Presencia del Envoltorio Plástico en las Barras Helicoidales Instaladas con Cartuchos de Resina en Corte Longitudinal. (a) Envolviendo a la Barra Helicoidal. (b) Pegado a la Pared del Tubo simulador*  
Fuente: Elaboración propia.

iv) *Aspereza / rugosidad.* La apreciación de la aspereza, de los morteros se llevó a cabo en los cortes de los segmentos de muestras. Como resultado de los ensayos de esta propiedad para diámetro y mortero ensayo, se concluye que el cementicio muestra mayor aspereza que la resina y lechada de cemento, básicamente por los granos de la arena que lleva en su formulación.

Como se detallado en los capítulos precedentes, las rugosidades de los morteros utilizados como acoplamiento de las barras helicoidales, fueron medidos en el laboratorio de la Facultad de Ingeniería Industrial de la UNMSM, como parte del conjunto de ensayos encomendados a dicho laboratorio. Para lo cual, previamente fueron pulidos las superficies de las probetas con lijas de diferentes asperezas. Las mediciones se hicieron con el Rugosímetro TR-200 –  $C = 0,25 \mu\text{m}$ ,  $RP_c = 97/\text{cm}$

Las mediciones de la rugosidad se hicieron en 8 posiciones en cada probeta preparada para este fin (4 pegados a la barra helicoidal y otros 4 pegado a la pared interior del tubo simulador). Asimismo, la medición se hizo en dos situaciones, uno en seco y otro luego de la prueba de absorción de agua que se detalla más adelante. Compilando y procesando estos datos se obtuvo la tabla 60, donde se puede confirmar que el cementicio es más rugoso que los otros morteros como se estimó mediante los ensayos al tacto, cuyo valor de rugosidad promedio en seco es de  $2,867 \mu\text{m}$ , mientras que el mortero menos rugoso es la lechada de cemento con  $1,093 \mu\text{m}$ .

Tabla 60

*Rugosidad de los Morteros Fraguados Antes y Después de la Prueba de Absorción de Agua*

Material de acoplamiento	Muestra	Rugosidad por muestra ( $\mu\text{m}$ )		Rugosidad por material de acoplamiento ( $\mu\text{m}$ )	
		Antes de la absorción	Después de absorción	Antes de la absorción	Después de absorción
Cartucho de cementicio	A (BHCC-33-4-1)	3,553	3,090	2,867	2,655
	B (BHCC-36-4-1)	2,777	2,984		
	C (BHCC-38-4-3)	2,034	1,961		
	D (BHCC-40-4-2)	3,104	2,586		
Cartucho de resina	E (BHCR-33-3-1)	2,048	1,992	1,921	1,829
	F (BHCR-36-3-1)	1,616	1,563		
	G (BHCR-38-2-2)	1,796	1,677		
	H (BHCR-40-3-3)	2,222	2,083		
Lechada de cemento	I (BHLC-33-4-1)	1,293	1,326	1,093	1,237
	J (BHLC-36-4-1)	1,316	1,325		
	K (BHLC-38-4-1)	0,815	1,251		
	L (BHLC-40-4-2)	0,947	1,048		

Fuente: Elaboración propia.

v) *Dureza*. Esta propiedad se midió mediante dos métodos: Primero mediante la escala de Mohs en el Laboratorio de Petrología de la Escuela de Ingeniería de Minas-UNMSM y segundo utilizando el durómetro digital TIME Hardness Tester TH 160 en el laboratorio de la FII-UNMSM.

Para las pruebas con la escala de Mohs, se emplearon cristales de calcita (3), fluorita (4), apatito (5) y ortosa (6). En caso del mortero de cementicio, logró rayarse con el cristal de apatito, lo cual indica que su dureza sería 5; mientras que la resina logra rayarse con el cristal de fluorita que tiene una dureza 4 y la lechada de cemento no se raya con el cristal de apatito, pero sí con el cristal de ortosa y una navaja de acero. Por consiguiente, según la escala de Mohs, la dureza de la lechada de cemento sería 5,5 (por rayarse con la navaja).

Las mediciones instrumentales de las durezas de los morteros de las barras helicoidales se llevaron a cabo en el laboratorio de la FII, utilizando el equipo antes indicado, equipo usa el método normalizado de Leeb, escala HL (Hardness Leeb) con una precisión es de  $\pm 6$  HLD para ello usa el patrón de dureza de una cara Demeq.

Las mediciones se hicieron en ambas bases de la probeta y en cada caso en 5 posiciones, tres cerca de la pared del tubo simulador y dos próximos a la barra helicoidal, con cuyos valores se han obtenido los promedios parciales y totales, resumidos en la tabla 61. La lechada de cemento muestra tener mayor dureza, con un valor promedio de 234,6 HL, mientras que el cementicio es la que arroja menos dureza con 200,3 HL y la resina un valor intermedio con 224,0 HL. Estos resultados discrepan con las durezas en la escala de Mohs (detalladas arriba), puesto que para los casos de cementicio y resina, según la medición instrumental, la resina tendría mayor dureza que el cementicio. Sin embargo, para la lechada de cemento ambos métodos confirman que tiene mayor dureza.

Tabla 61

*Dureza Promedio de los Morteros Fraguados de las Barras Helicoidales*

Muestra	Mortero	Dureza (HL)					Promedio	Promedio por material
		Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5		
A (BHCC-33-4-1)	Cartuchos de cementicio	110	168	131	161	118	137,6	200,3
B (BHCC-36-4-1)		184	214	215	215	235	212,6	
C (BHCC-38-4-3)		213	197	210	219	203	208,4	
D (BHCC-40-4-2)		221	289	216	269	217	242,4	
E (BHCR-33-3-1)	Cartuchos de resina	267	234	243	258	229	246,2	224,0
F (BHCR-36-3-1)		287	208	226	217	214	230,4	
G (BHCR-38-2-2)		198	219	236	182	220	211,0	
H (BHCR-40-3-3)		197	208	210	236	190	208,2	
I (BHLC-33-4-1)	Lechada de cemento	228	239	236	257	228	237,6	234,6
J (BHLC-36-4-1)		223	224	225	234	229	227,0	
K (BHLC-38-4-1)		231	217	228	232	221	225,8	
L (BHLC-40-4-2)		247	248	238	245	262	248,0	

Fuente: Elaboración propia.

vi) *Densidad.* Para determinar las densidades de los morteros de las barras helicoidales, fue necesario contar con instrumental de laboratorio, entre otros, una balanza analítica, por lo que se solicitó el servicio del laboratorio de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica de la UNMSM. La medición de esta propiedad se hizo para cada diámetro de tubo simulador ensayado, con lo cual se obtuvieron los promedios que se presenta en la tabla 62.

Como puede apreciarse en la tabla N° 62, los tres tipos de mortero utilizados en el estudio, muestran una densidad parecida, con ligeras diferencias, entre ellos, los cartuchos de cementicio muestran una densidad ligeramente mayor que los otros dos (2,073 g/cc), seguido por el cartucho de resina (1,956 g/cc). Para el caso del cartucho de cementicio, se hizo ensayo adicional haciendo fraguar en su propio envoltorio, dando como resultado un valor similar de su densidad que fraguado dentro del tubo simulador, con un valor promedio de 2,021 g/cc.

Tabla 62

*Densidades Promedio de los Morteros Fraguados de las Barras Helicoidales*

Muestra	Material de acoplamiento	Pesos (g)			Probeta con muestra y agua		Densidad ( $\rho$ ) $\rho = M/(V - (PT-PM))$ (g/cc)	Densidad promedio (g/cc)
		Probeta vacía (P)	Muestra (M)	P + M (PM)	Volumen (V) (cc)	Peso (PM + agua) (PT) (g)		
A (BHCC-33-4-1)	Cartuchos de cementicio	90,5	38	128,5	110	221,8	2,275	2,073
B (BHCC-36-4-1)		90,5	28,5	119	110	214,2	1,926	
C (BHCC-38-4-3)		90,5	40,3	130,8	110	220,5	1,985	
D (BHCC-40-4-2)		90,5	59,4	149,9	110	231,7	2,106	
E (BHCR-33-3-1)	Cartuchos de resina	90,6	23,9	114,5	110	212,9	2,060	1,956
F (BHCR-36-3-1)		90,5	37,8	128,3	110	219,8	2,043	
G (BHCR-38-2-2)		90,5	39,1	129,6	110	219,5	1,945	
H (BHCR-40-3-3)		90,5	25,2	115,7	110	211,5	1,775	
I (BHLC-33-4-1)	Lechada de cemento	90,5	22	112,5	110	210,8	1,880	1,915
J (BHLC-36-4-1)		90,5	22	112,5	110	210,5	1,833	
K (BHLC-38-4-1)		90,5	44,8	135,3	110	222,4	1,956	
L (BHLC-40-4-2)		90,5	40,4	130,9	110	220,6	1,990	
Fraguado en su propio envoltorio	Cartucho de cementicio	90,6	57	147,6	110	229,4	2,021	2,021

Fuente: Elaboración propia.

vii) *Absorción de agua – hidratación.* Esta prueba también se realizó en la Escuela de Ingeniería Metalúrgica – UNMSM, haciendo los pesajes con la balanza analítica balanza analítica digital Advancer Z OHAUS Máxima carga: 310 g, precisión: 0,001 g. Antes de sumergir las probetas en dentro del agua, se hicieron los pesajes de cada probeta 3 veces para un adecuado registro de sus valores; luego se mantuvo inmerso dentro del agua las probetas por 6 horas 5 minutos, siendo la temperatura del agua 22,2 °C.

Transcurrido dicho tiempo se extrajeron las probetas y luego de secarlos externamente con paños absorbentes, se colocaron dentro de una mufla a 30 °C por 10 minutos, antes de volverlos a pesar en la misma balanza analítica. Posteriormente, se compilaron los datos registrados y por diferencia de pesos se calcularon el peso de agua absorbido y finalmente expresado en porcentaje, cuyo resumen se presenta en la tabla 63.

Los resultados mostrados en la tabla anterior, demuestran que el mortero que más agua absorbe es la lechada de cemento para cualquier diámetro de tubo simulador y el que menos se humedece es la resina.

Tabla 63

*Porcentaje de Agua Absorbida por los Morteros Fraguados de las Barras Helicoidales*

Diámetro de tubo simulador (mm)	Absorción de agua (%)		
	Cementicio	Resina	Lechada de Cemento
32,50	0,24	0,17	0,34
36,30	0,36	0,04	0,56
38,30	0,56	0,15	0,82
42,00	0,45	0,26	0,88

Fuente: Elaboración propia.

viii) *Tratamiento térmico.* Este ensayo se realizó en el laboratorio de la FII, para analizar el comportamiento de los morteros al ser sometidos a altas temperaturas en un horno eléctrico modelo MUFLA de 12 kW y 220 V. Una vez calentado el horno y manteniendo la temperatura de 100 °C, se introdujeron las muestras y mantuvo por espacio de dos horas, analizando el estado de los testigos, se concluyó que la temperatura de 100 °C no afecta en absoluto a los morteros.

Un segundo estadio de ensayo se llevó a cabo a 200 °C de temperatura, por espacio de 7 horas 38 minutos, se aprecia que las muestras de mortero no sufrieron cambios sustanciales, en su estructura ni coloración, salvo el envoltorio plástico de los cartuchos de cementicio y resina que quedaron calcinados.

El tercer estadio del ensayo se llevó a cabo a la temperatura de 400 °C y por espacio de 2 horas 1 minuto. El cementicio no sufre cambios sustanciales en su estructura, únicamente una ligera variación en su coloración, que pasa de gris a beige rojizo. En cambio, la resina quedó completamente calcinada, perdiendo todas sus propiedades físicas y químicas, prácticamente queda convertida en ceniza fácilmente disgregable con los dedos de la mano con una textura pulverulenta. La lechada de cemento tampoco sufre cambios sustanciales, únicamente se nota fisurada por el cambio brusco de temperatura al momento de extraerlo de la mufla.

### 8.3 discusión Global de Resultados para Todos los Pernos Estudiados

#### 8.3.1 Capacidad de anclaje en función de la longitud efectiva de anclaje.

**A) Para 32,5 mm de diámetro de tubo simulador.** En tubos simuladores de 32,5 mm (33 mm), se ensayaron los siguientes pernos de roca, pernos inflables Hydrabolt y Swellex (X-Pandabolt) y, las barras helicoidales en combinación con los morteros: Cartucho de cementicio, cartuchos de resina y lechada de cemento. La tabla 64, presenta en resumen la capacidad de anclaje de los 5 tipos de pernos instalados en tubos simuladores de 32,5 mm en función de la longitud efectiva de anclaje (LEA), donde se observa que la combinación que muestra mayor capacidad de anclaje es la barra helicoidal instalada con cartuchos de resina; seguido por las instaladas con lechada de cemento. Como también puede corroborarse en la figura 207, los pernos que muestran menor capacidad de anclaje en este diámetro son los X-Pandabolt, seguidos por los Hydrabolt.

Las barras helicoidales, muestran una capacidad de anclaje ascendente hasta 3 pies de LEA, a partir de la cual se tornan asintóticas o inclusive tienden a la baja. Esto demuestra que la LEA óptima cuando se instalan las barras helicoidales en tubos simuladores (taladros) de 32,5 mm es 3 pies. Los pernos Hydrabolt y X-Pandabolt muestran un comportamiento distinto, cuyas capacidades de anclaje tienden seguir ascendiendo más allá de 4 pies de LEA; pero muy por debajo de las barras helicoidales.

Tabla64

*Capacidad de Anclaje de los Pernos Instalados en Tubos Simuladores de 32,5 mm en Función de la LEA*

LEA (pies)	Capacidad de anclaje en tubo simulador de 32,5 mm (ton)				
	Hydrabolt	Swellex X-Pandabolt	B. Helic. C. Cementicio	B. Helic. C. Resina	B. Helic. L. Cemento
1	9,52	1,43	15,88	19,85	17,37
2	9,52	2,38	20,83	21,25	22,17
3	11,42	3,57	21,00	21,00	22,00
4	13,32	8,33	21,67		21,33

Fuente: Elaboración propia.

**B) Para 36,3 mm de diámetro de tubo simulador.** En tubos simuladores de este diámetro, se instalaron la misma combinación de pernos que en el caso anterior, es decir: Hydrabolt, X-Pandabolt y barras helicoidales con cartuchos de cementicio y resina y, lechada de cemento. En este diámetro, las barras helicoidales instaladas con cartuchos de



resina vuelven a mostrar mayor capacidad de anclaje, seguido por los pernos Hydrabolt, tal como puede apreciarse en la tabla 65.

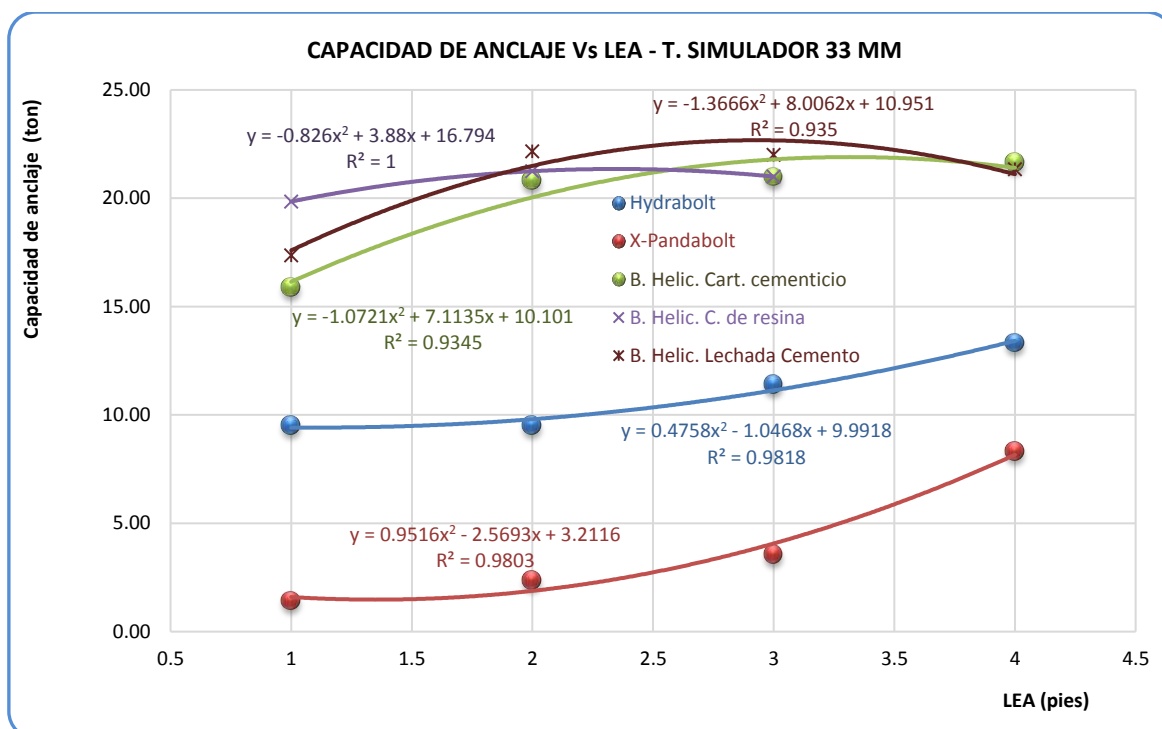


Figura 207. Capacidad de Anclaje de Pernos Instalados en Tubos Simuladores de 32,5 mm Vs LEA  
Fuente: Elaboración propia.

Tabla65

Capacidad de Anclaje de las Barras Helicoidales en Tubos Simuladores de 36,3 mm en Función de la LEA

LEA (pies)	Capacidad de anclaje en tubo simulador de 36,3 mm (ton)				
	Hydrabolt	X-Pandabolt	B. Helic. C. Cementicio	B. Helic. C. Resina	B. Helic. L. Cemento
1	9,52	4,76	7,94	11,91	7,19
2	13,32	6,34	9,59	16,87	7,94
3	13,32	9,52	13,89	17,37	11,25
4	15,23	13,80	13,89		11,66

Fuente: Elaboración propia.

Graficando los valores de la tabla anterior, se obtiene el gráfico de la figura 208, donde se puede apreciar que los pernos X-Pandabolt muestran la más baja capacidad de anclaje, seguido por la barra helicoidal instalada con lechada de cemento. Otro aspecto que muestra este gráfico es que la mayoría de las alternativas de pernos muestran una capacidad de anclaje ascendente hasta 3 pies de LEA, por encima de la cual, pierden pendiente o declinan; el comportamiento de los pernos X-Pandabolt, difiere de los otros pernos, puesto que se muestra creciente más allá de 4 pies de LEA, inclusive superando a la barra helicoidal instalada con lechada de cemento más allá de 3,5 pies de LEA.

A) Para 38,3 mm de diámetro de tubo simulador. Con estos tubos simuladores, se hicieron ensayos de todos los pernos estudiados, como se resume en la tabla 66, donde se aprecia que los pernos que muestran mayor capacidad de anclaje son los Hydrabolt, seguido por los X-Pandabolt. El perno que muestra menor capacidad de anclaje son los Split Sets, seguido por las barras helicoidales instaladas con lechada de cemento.

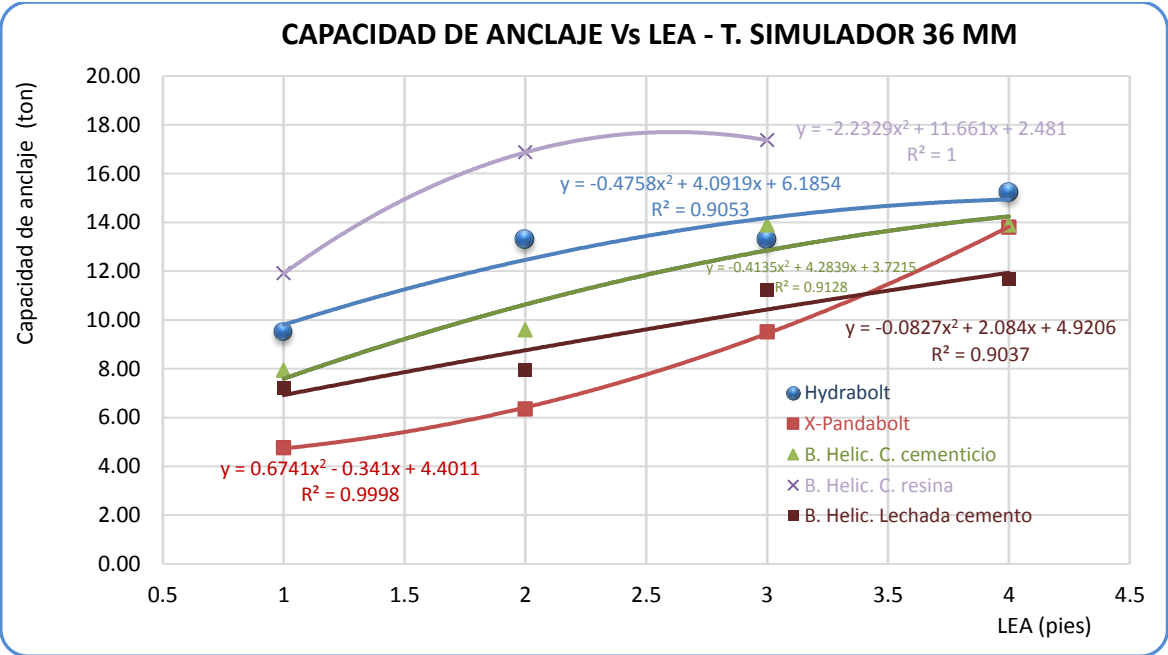


Figura 208. Capacidad de Pernos de Rocas Instalados en Tubos Simuladores de 36,3 mm Vs LEA  
Fuente: Elaboración propia.

Tabla66  
Capacidad de Anclaje de los Pernos de Roca Instalados en Tubos Simuladores de 38,3 mm de Diámetro Vs LEA

LEA (pies)	Capacidad de anclaje en tubo simulador de 38,3 mm (ton)					
	Split Set	Hydrabolt	Swellex (X-Pandabolt)	B. Helic. C. Cementicio	B. Helic. C. Resina	B. Helic. L. Cemento
1	2,81	9,52	9,52	3,97	9,92	5,62
2	3,97	15,23	12,13	11,25	11,91	7,94
3	6,70	15,23	14,27	13,89	10,92	7,94
4	6,95	15,23	15,23	13,56		11,08

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 209, se puede apreciar que las capacidades de anclaje con excepción de la barra helicoidal instalada con lechada de cemento, se mantienen ascendentes hasta 3 pies de LEA, por encima de la cual sufren un decaimiento con tendencia a descender. Por consiguiente, para este diámetro de tubo simulador se repite el escenario mostrado para los diámetros anteriores, es decir la LEA óptima sería 3 pies.

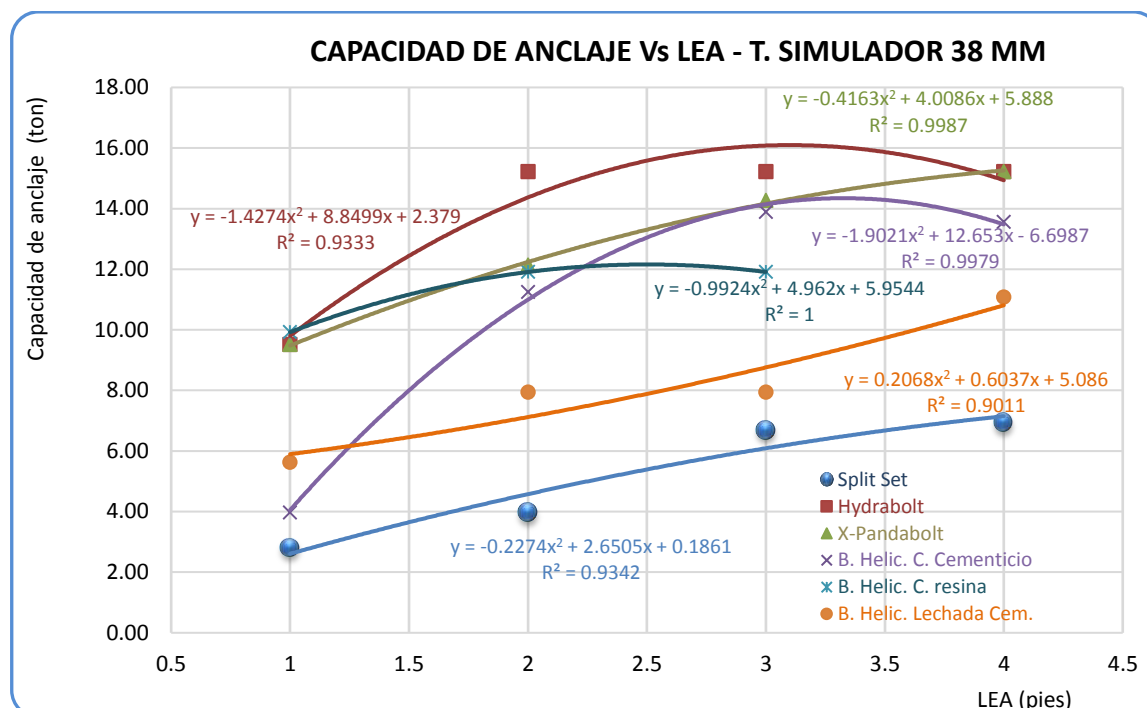


Figura 209. Capacidad de Anclaje de Pernos de Roca Instalados en Tubos Simuladores de 38,3 mm Vs LEA  
Fuente: Elaboración propia.

**C) Para 40,96 mm de diámetro de tubo simulador.** Los pernos ensayados en tubos simuladores de 40,96 mm (40 mm) de diámetro fueron los pernos inflables Hydrabolt y X-Pandabolt, cuyas capacidades de anclaje en resumen se presentan en la tabla 67, donde se puede apreciar que en este diámetro ambos pernos muestran similar capacidad de anclaje, con ligera ventaja de los Hydrabolt.

Tabla67

*Capacidad de Anclaje de los Pernos Inflables en tubo Simulador de 40,96 mm Vs LEA*

LEA (pies)	Capacidad de anclaje en tubo simulador de 40 mm (ton)	
	Hydrabolt	X-Pandabolt
1	11,42	8,41
2	13,32	13,32
3	15,23	15,23
4	15,23	15,23

Fuente: Elaboración propia.

La figura 210, ilustra el comportamiento de la capacidad de anclaje de los pernos Hydrabolt y X-Pandabolt. En ambos casos, se muestra ascendente hasta 3 pies de LEA, por encima este valor sufre una inflexión y con tendencia a la baja. Igual que en los casos anteriores, para los pernos inflables, instalados en tubos simuladores de este diámetro, la LEA ideal sería 3 pies, usar LEAs superiores a este valor es innecesario.

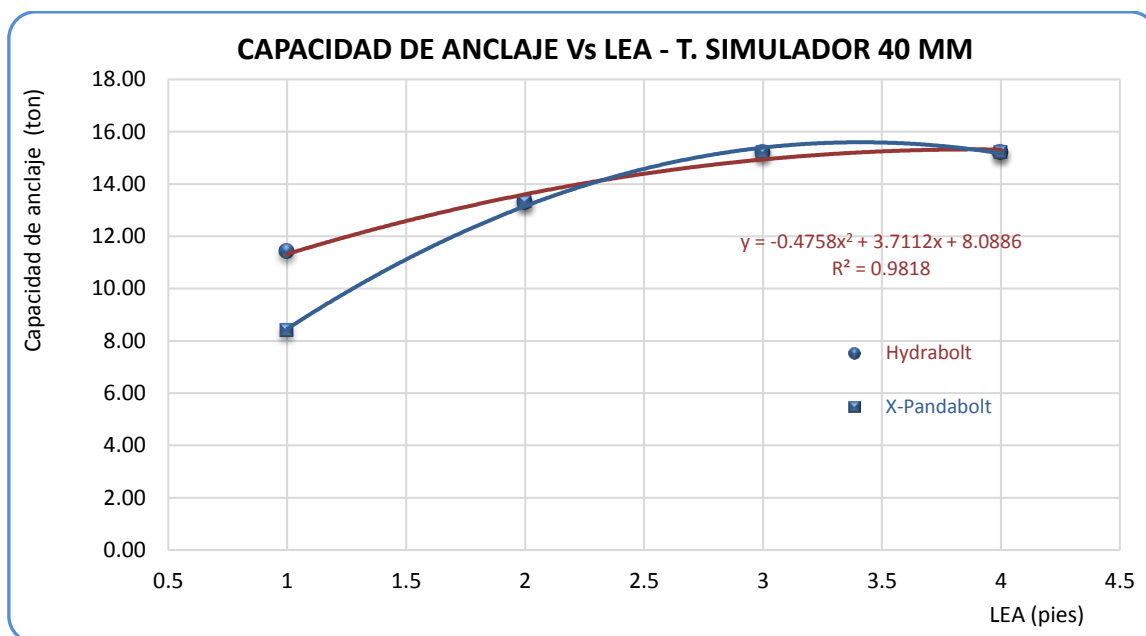


Figura 210. Capacidad de anclaje de los Hydrabolt y X-Pandabolt instalados en tubos simuladores de 40,96 mm Vs LEA.

Fuente: Elaboración propia.

**D) Para 42 mm de diámetro de tubo simulador.** En este diámetro de tubos simuladores, se ensayaron las barras helicoidales instaladas con cartuchos de cementicio y resina y, lechada de cemento. La tabla 68 presenta los promedios de las capacidades de anclaje de las 3 combinaciones, donde la alternativa que muestra mayor capacidad de anclaje son las barras helicoidales instaladas con cartuchos de resina, seguido por las instaladas con cartuchos de cementicio.

Tabla68

*Capacidad de Anclaje de las Barras Helicoidales en Tubo Simulador de 42 mm Vs LEA y Diferentes Materiales de Acoplamiento*

LEA (pies)	Capacidad de anclaje en tubo simulador de 42 mm (ton)		
	B. Helic. C. Cementicio	B. Helic. C. Resina	B. Helic. L. Cemento
1	2,48	13,89	2,98
2	11,91	19,35	7,94
3	17,37	17,86	17,37
4	21,34		19,85

Fuente: Elaboración propia.

Como puede apreciarse en la figura 211, la capacidad de anclaje de las barras helicoidales instaladas con cartuchos de resina, muestran capacidad de anclaje ascendente hasta 2 pies de LEA; mientras que las instaladas con cartucho de cementicio y lechada de cemento, hasta 4 pies de LEA.

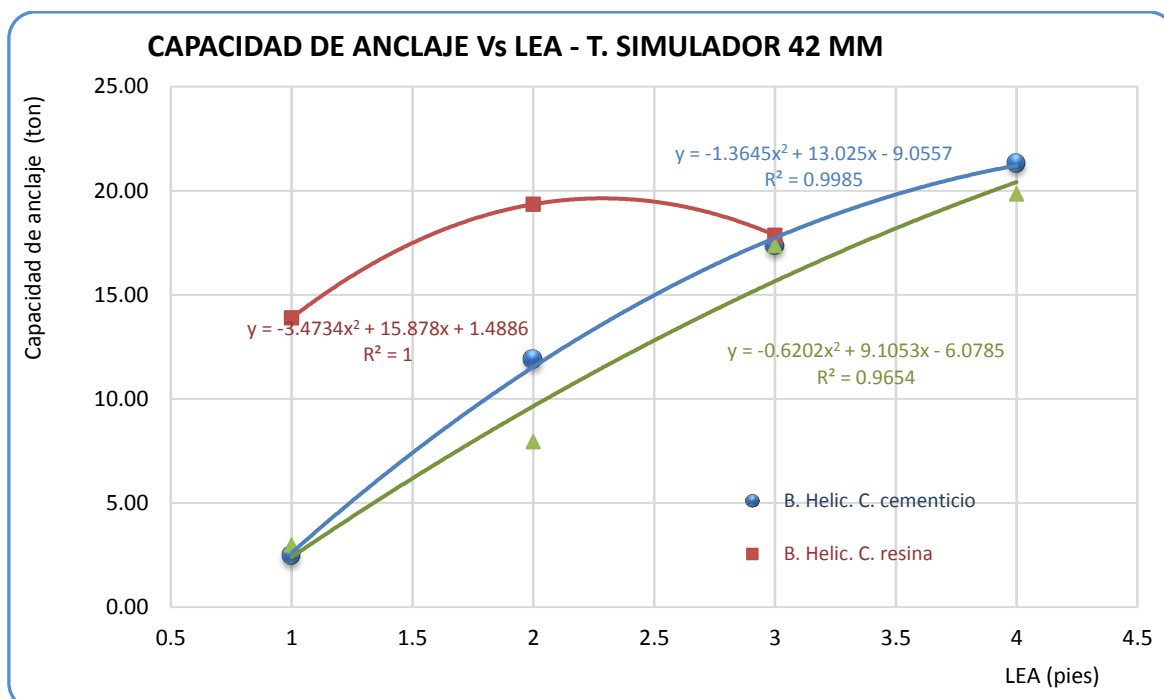


Figura 211. Capacidad de anclaje de las barras helicoidales instaladas en tubos simuladores de 42 mm Vs LEA y distintos morteros

Fuente: Elaboración propia.

**E) Capacidad de anclaje en función de la longitud efectiva de anclaje para todas las combinaciones.** La tabla 69, muestra en resumen la capacidad de anclaje de los pernos de roca instalados en tubos simuladores de diferentes diámetros en función de la LEA. Como se ha detallado en los capítulos IV, V, VI, VII y este capítulo, con este propósito el estudio consideró hacer los ensayos en 4 longitudes efectivas de anclaje, LEA (1, 2, 3 y 4 pies). Sin embargo, los ensayos de las barras helicoidales instaladas con cartuchos de resina correspondientes a 4 pies de LEA, no pudieron concretarse por la imposibilidad de instalarlas, primero por la rapidez de fraguado de la resina y segundo, por la limitada capacidad del equipo de instalación utilizado (roto martilló Bosch GBH 11 DE). Es por ello que, los ensayos correspondientes a esta combinación, se llevaron a cabo únicamente con 1, 2 y 3 pies de LEA.

Graficando los valores de la tabla 69, se visualiza el comportamiento de la capacidad de anclaje de los diferentes tipos de pernos ensayados en función de la LEA, instalados en tubos simuladores; tal es así que de la figura 212, se puede extraer las siguientes conclusiones abajo indicadas.

Los pernos que muestran mayor capacidad de anclaje, son las barras helicoidales instaladas en tubos simuladores de 32,5 mm (33 mm) y dentro de éstas, la barra helicoidal instalada con lechada de cemento, seguido por las instaladas con cartuchos de resina. Por

consiguiente, el diámetro ideal para instalar las barras helicoidales con cualquier material de acoplamiento es 32,5 mm (33 mm).

- a) El diámetro óptimo para instalar los pernos inflables Hydrabolt, es 38,3 mm (38 mm) y para los X-Pandabolt 40,96 mm (40 mm).
- b) El diámetro óptimo para instalar los Split Sets es 37,3 mm (37 mm)
- c) Los pernos Swellex (X-Pandabolt) instalados tubos simuladores de 33 mm, son los que muestran menor capacidad de anclaje, seguido por los Split Sets instalados en tubos simuladores de 39 mm.
- d) La mayoría de las combinaciones muestran una LEA óptima de 3 pies, por encima de este valor es innecesario.



Tabla69

*Capacidad de Anclaje de los Pernos de Roca en Función de la LEA en Diferentes Diámetros de Tubo Simulador*

Capacidad de anclaje Vs LEA (ton)																							
LEA (pies)	Diám. T. Sim. = 33 mm					Diám. T. Sim. = 36 mm					DTS = 37 mm	Diám. T. Sim. = 38 mm					DTS = 39 mm	Diám. T. Sim. = 40 mm			Diám. T. Sim. = 42 mm		
	Hy	X-P	BHCC	BHCR	BHLC	Hy	X-P	BHCC	BHCR	BHLC	SS	SS	Hy	X-P	BHCC	BHCR	BHLC	SS	Hy	X-P	BHCC	BHCR	BHLC
1	9,52	1,43	15,88	19,85	17,37	9,52	4,76	7,94	11,91	7,19	2,71	2,81	9,52	6,50	3,97	9,92	5,62	1,65	11,42	8,41	2,48	13,89	2,98
2	9,52	2,38	20,83	21,25	22,17	13,32	6,34	9,59	16,87	7,94	4,96	3,97	15,23	12,13	11,25	11,91	7,94	3,97	13,32	13,32	11,91	19,35	7,94
3	11,42	3,57	21,00	21,00	22,00	13,32	9,52	13,89	17,37	11,25	5,95	6,70	15,23	14,27	13,89	10,92	7,94	3,80	15,23	15,23	17,37	17,86	17,37
4	13,32	8,33	21,67		21,33	15,23	13,80	13,89		11,66	7,44	6,95	15,23	15,23	13,56		17,37	5,95	15,23	15,23	21,34		19,85

LEA = Longitud efectiva de anclaje. DTS = Diámetro de tubo simulador. Hy = Hydrabolt. X-P = X-Pandabolt. BHCC = Barra helicoidal con cartuchos de cementicio.

BHCR = Barra helicoidal con cartuchos de resina. BHLC = Barra helicoidal con lechada de cemento. SS = Split Set.

Fuente: Elaboración propia.

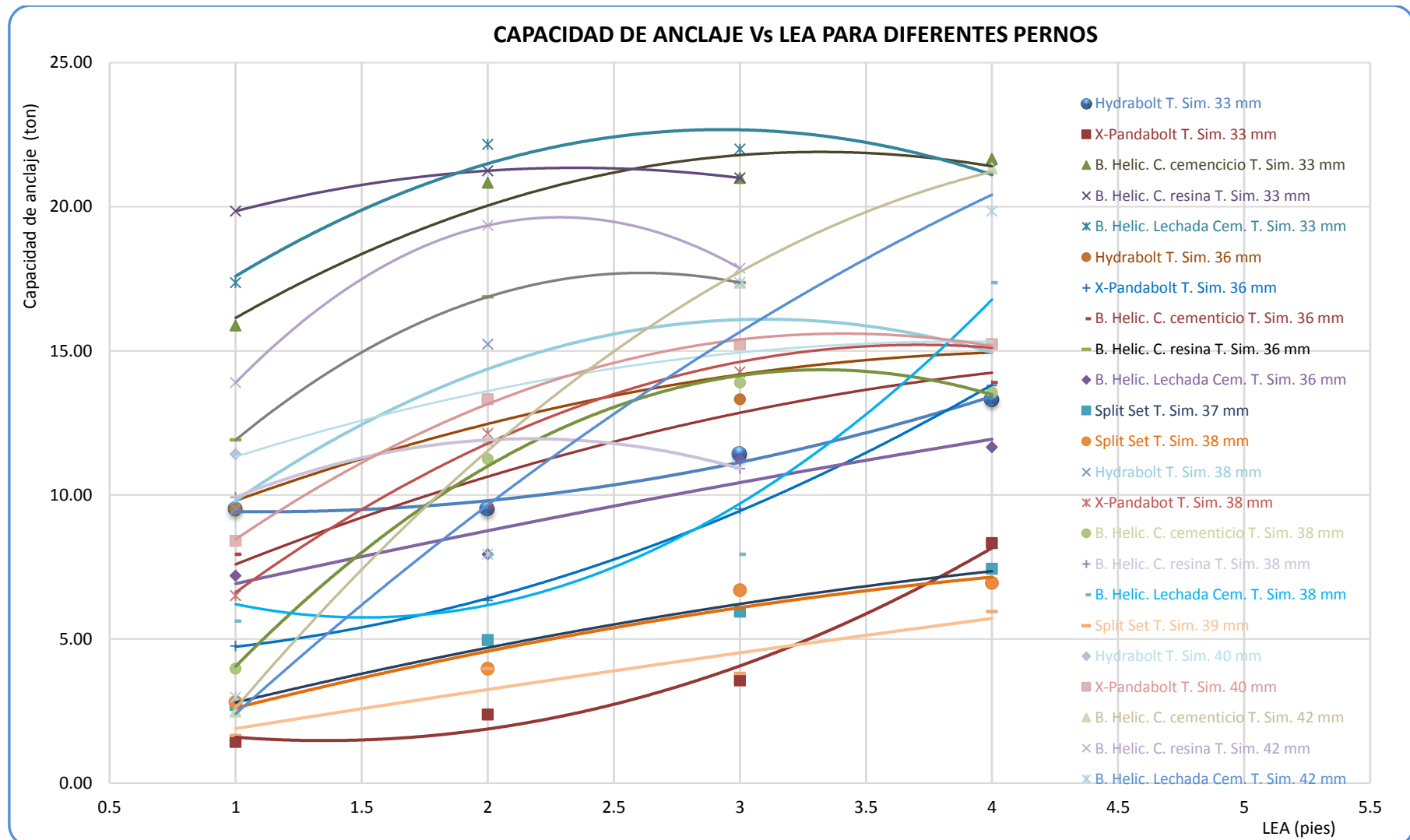


Figura 212. Capacidad de Anclaje de Pernos de Roca Instalados en Tubos Simuladores de Diferentes Diámetros en Función de la LEA.

Fuente: Elaboración propia.

### 8.3.2 Capacidad de anclaje en función del diámetro del tubo simulador.

A) *Para 1 pie de la longitud efectiva de anclaje.* Para esta longitud efectiva de anclaje, se hizo una prueba adicional de instalar las barras helicoidales con mortero mixto, es decir, en los tubos simuladores se colocaron mitad cartucho de cementicio y la otra mitad con cartuchos de resina. El resumen de la capacidad de anclaje de los pernos de roca estudiados con LEA de 1 pie, se presenta en la tabla 70, donde se aprecia que el perno que muestra mayor capacidad de anclaje, es la barra helicoidal instalada con cartuchos de resina. Cabe destacar que empieza con valor alto (19,85 ton) para 32,5 mm de diámetro, valor del que va en descenso como aumenta el diámetro hasta 38,3 mm, luego del cual, vuelve ascender visiblemente más allá de 42 mm.

Los pernos que menor capacidad de anclaje muestran son los Split Sets, cuyo comportamiento puede visualizarse en la figura 213, se observa que al aumentar el diámetro la capacidad de anclaje de estos pernos descende. Asimismo, la capacidad de anclaje de las barras helicoidales, descende bruscamente como aumenta el diámetro de los tubos simuladores. Mientras que, para los pernos inflables, su capacidad de anclaje aumenta como crece el diámetro del tubo simulador, en caso de los Hydrabolt hasta 38 mm y para los X-Pandabolt hasta 41 mm.

Tabla70

*Capacidad de Anclaje de los Pernos de Roca en Función del Diámetro del Tubo Simulador para 1 pie de LEA*

Diámetro interior del tubo simulador (mm)	Capacidad de anclaje para LEA = 1 pie (ton)						
	Split Set	Barra Helicoidal con Cartucho de Cementicio	Barra Helicoidal con Cartucho de Resina	Barra Helicoidal con Lechada de Cemen.	Barra Helicoidal con Cartuchos de Cementicio + resina.	Hydrabolt	
32,50		15,88	19,85	17,37	15,88	9,52	1,43
36,30		7,94	11,91	7,19	2,98	9,52	4,76
37,30	2,71						
38,14	2,81						
38,30	1,65	3,97	9,92	5,62	11,91	9,52	6,50
40,96						11,42	8,41
42,00		2,48	13,89	2,98	7,44		

Fuente: Elaboración propia.

Como puede apreciarse en la figura 213, para 1 pie de LEA, el diámetro más conveniente para la instalación de las barras helicoidales es 32,5 mm, por demostrar su mayor capacidad de anclaje y menor costo para la instalación de estos pernos (Perforación, mortero, etc.). Para los pernos inflables Hydrabolt y X-Pandabolt, 38 mm y 40 mm, respectivamente.

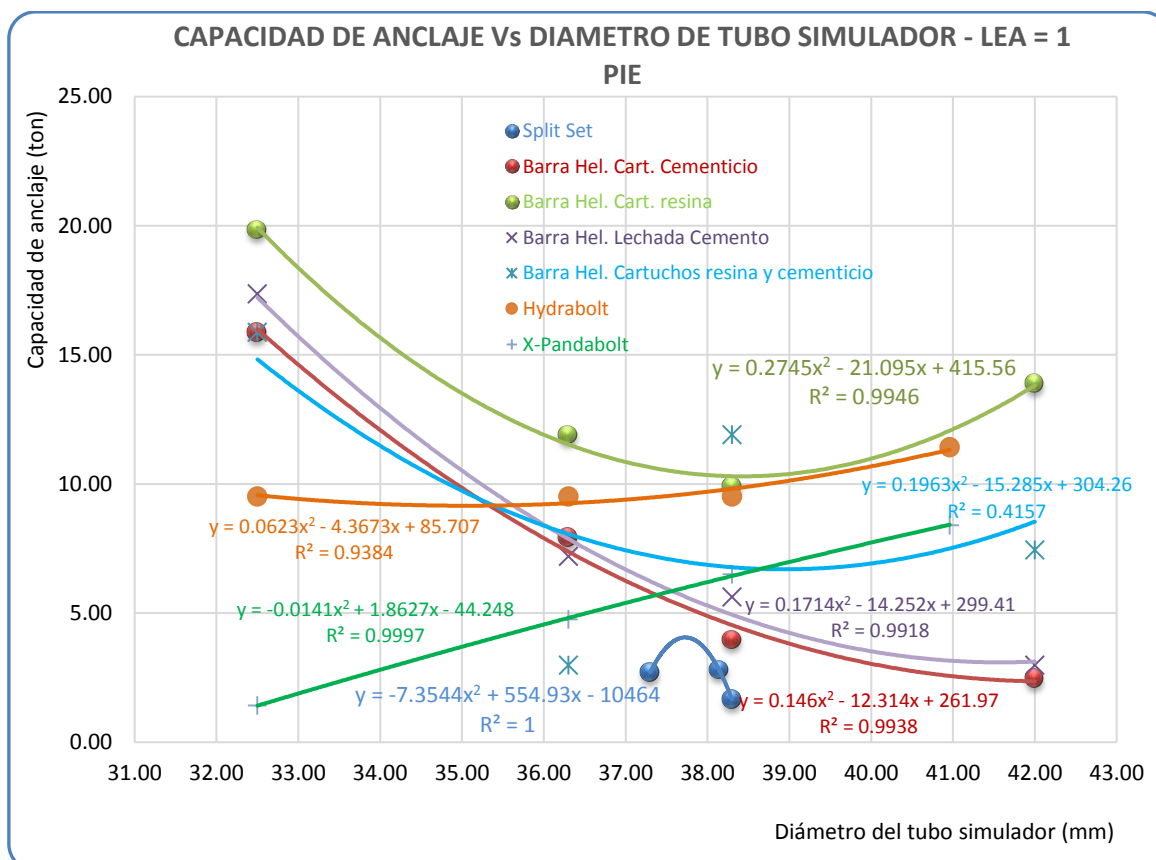


Figura 213. Capacidad de Anclaje de los Pernos de Roca en Función del Diámetro de Tubo Simulador para 1 pie de LEA

Fuente: Elaboración propia.

**B) Para 2 pies de longitud efectiva de anclaje.** También para esta longitud efectiva de anclaje, las barras helicoidales instaladas con cartuchos de resina muestran mayor capacidad de anclaje que el resto de los pernos, como puede corroborarse en la tabla 71 y la figura 214, en los que se aprecia las capacidades de anclaje de los diferentes tipos de pernos para la LEA de 2 pies. Asimismo, Las barras helicoidales muestran mayor capacidad de anclaje para 32,5 mm de diámetro de tubo simulador, para cualquier tipo de mortero, luego del cual descienden hasta 39 mm para luego volver a ascender. Por consiguiente, el diámetro óptimo para instalar las barras helicoidales sería 32,5 mm (33 mm).

En caso de los pernos inflables, su capacidad de anclaje se muestra bajo para el diámetro de 32,5 mm, al incrementarse el diámetro, aumenta su capacidad de anclaje, como puede apreciarse en la figura 214, el Hydrabolt alcanza su mayor capacidad de anclaje a 38 mm de diámetro, mientras que los X-Pandabolt a 40,96 mm.

Los Split Sets, tienen una capacidad de anclaje menor que los demás pernos. Muestran su mayor capacidad de anclaje, cuando se instalan en tubos simuladores de 37 mm, para diámetros mayores, su capacidad cae vertiginosamente.

Tabla 71

*Capacidad de Anclaje de los Pernos de Roca en Función del Diámetro de Tubo Simulador para 2 pies de LEA*

Diámetro del tubo simulador (mm)	Capacidad de anclaje para LEA = 2 pies (ton)					
	Split Set	Barra Helicoidal con Cartucho de Cementicio	Barra Helicoidal con Cartucho de Resina	Barra Helicoidal con Lechada de Cemento	Hydrabolt	X-Pandabolt
32,50		20,83	21,25	22,17	9,52	2,38
36,30		9,59	16,87	7,94	13,32	6,34
37,30	4,96					
38,14	3,97					
38,30	3,97	11,25	11,91	7,94	15,23	12,13
40,96					13,32	13,32
42,00		11,91	19,35	7,94		

Fuente: Elaboración propia.

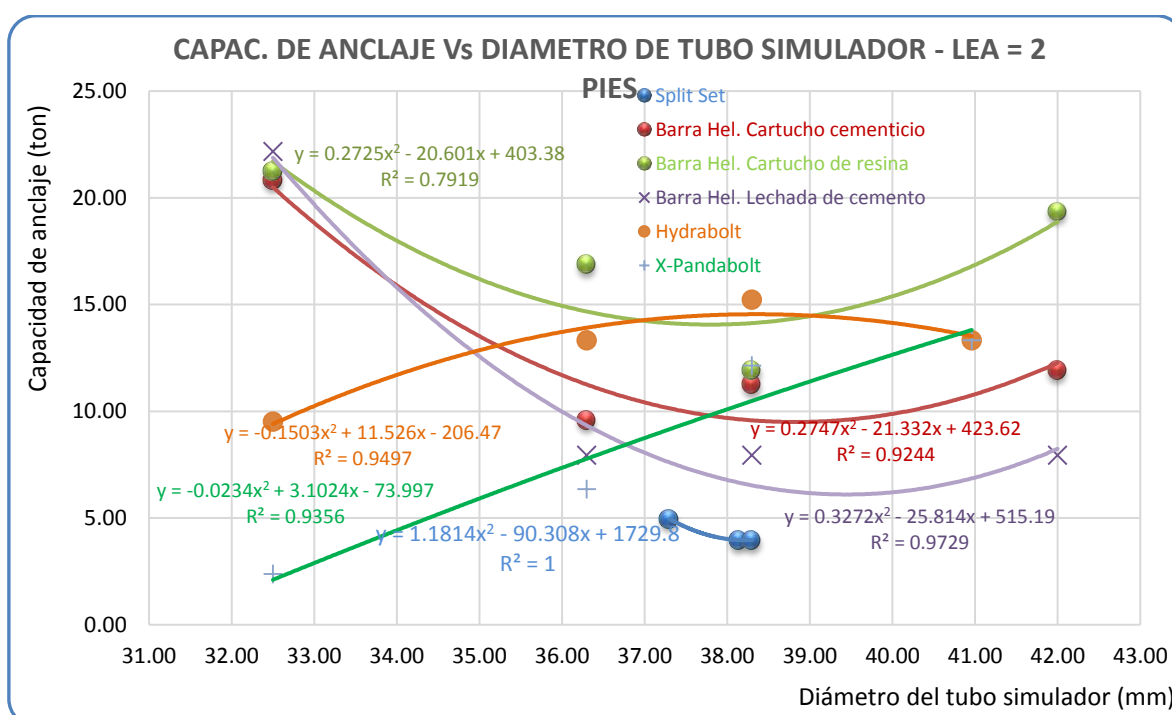


Figura 214. Capacidad de Anclaje de los Pernos de Roca en Función del Diámetro de Tubo Simulador para 2 pies de LEA.

Fuente: Elaboración propia.

**C) Para 3 pies de longitud efectiva de anclaje.** Para esta LEA, los pernos tienen similar comportamiento que en los casos anteriores, cuyas capacidades de anclaje se resume en la tabla 72, cuyas correspondencias se han graficado en la figura 215, donde se observa que si bien las barras helicoidales con las tres alternativas de mortero de acoplamiento muestran mayor capacidad de anclaje que los demás pernos, para diámetros de entre 32 mm y 36,5 mm, pero en descenso; para mayores diámetros de entre 37 mm y 38 mm es superado por los pernos inflables Hydrabolt. Los pernos que siguen mostrando menor capacidad de anclaje para esta LEA, son los Split Sets, seguido por los pernos inflables X-Pandabolt.

Como puede corroborarse en la figura 215, el diámetro ideal para instalar las barras helicoidales es 32,5 mm (33 mm), dado que, para diámetros superiores, su capacidad de anclaje desciende considerablemente, por ejemplo, cuando se instala con cartuchos de resina en tubos simuladores de 32,5 mm su capacidad de anclaje es de 21,25 ton, pero para 38,3 mm desciende a 11,91 mm. En caso de los pernos inflables ocurre lo contrario, puesto que, en diámetro de 32,5 mm, alcanza una capacidad de anclaje de 11,42 ton mientras que a 38,3 mm 15,22 ton. Por consiguiente, el diámetro óptimo para instalar los pernos Hydrabolt es este último diámetro, y, para los X-Pandabolt 40,96 mm. Para el caso de los Split Sets, el diámetro ideal es 38 mm para esta LEA.

Tabla 72

*Capacidad de Anclaje de los Pernos de Roca en Función del Diámetro del Tubo Simulador para 3 pies de LEA*

Diámetro interior del tubo simulador (mm)	Capacidad de anclaje para LEA = 3 pies (ton)					
	Split Set	Barra Helicoidal con Cartucho de Cementicio	Barra Helicoidal con Cartucho de Resina	Barra Helicoidal con Lechada de Cemento	Hydrabolt	X-Pandabolt
32,50		21,00	21,25	21,00	11,4192	3,5685
36,30		13,89	16,87	17,37	13,3224	9,516
37,30	5,95					
38,14	6,70					
38,30	3,80	13,89	11,91	10,92	15,2256	14,274
40,96					15,2256	15,2256
42,00		17,37	19,35	17,86		

Fuente: Elaboración propia.

**D) para 4 pies de la longitud efectiva de anclaje.** Como se indicado arriba, para esta LEA no se pudo llevar a cabo los ensayos correspondientes a las barras helicoidales instaladas con cartuchos de resina. La tabla 73, ilustra en resumen el promedio de las capacidades de anclaje de los diferentes tipos de pernos, donde se aprecia que el perno que muestra mayor capacidad de anclaje para la LEA de 4 pies es la barra helicoidal instalada con cartuchos de cementicio, secundado por la instalada con lechada de cemento, y los pernos que muestran menor capacidad de anclaje son los Split Sets.



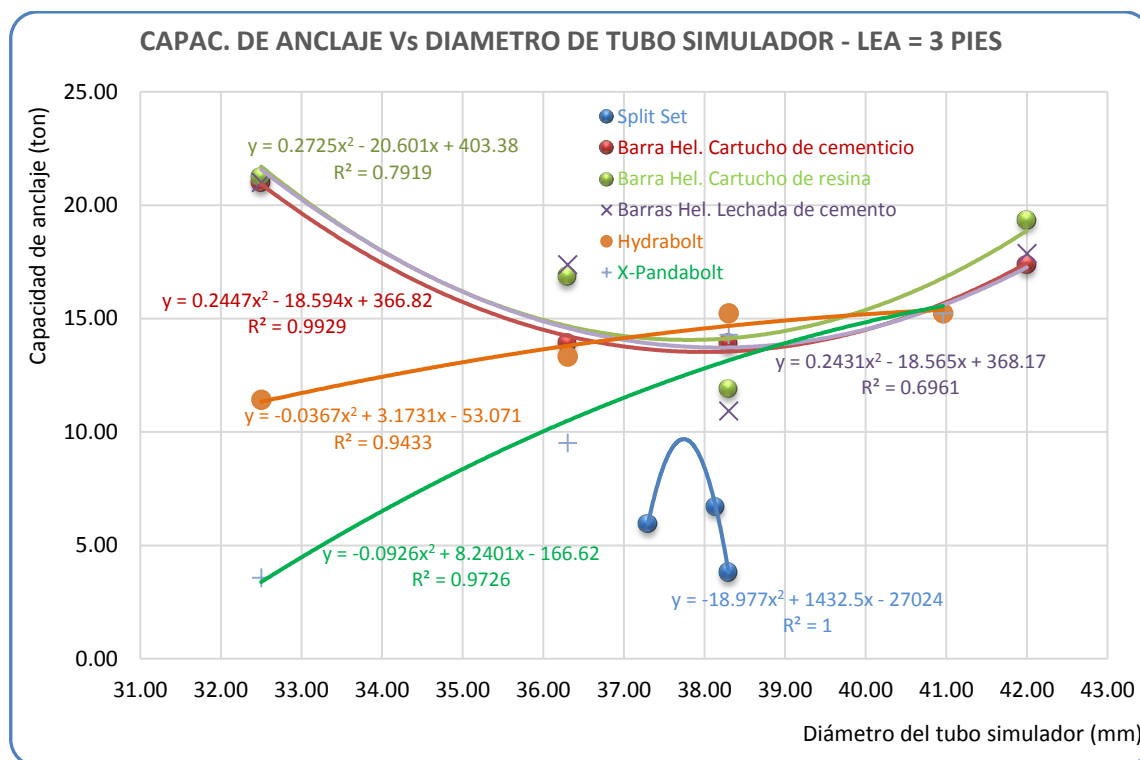


Figura 215. Capacidad de Anclaje de los Pernos de Roca en Función del Diámetro de Tubo Simulador para 3 pies de LEA

Fuente: Elaboración propia.

La capacidad de anclaje de las barras helicoidales, desciende como aumenta el diámetro de tubo simulador. Como puede apreciarse en la tabla 73 y la figura 216, para 32,5 mm la barra helicoidal instalada con cartucho de cementicio muestra una capacidad de anclaje de 21,67 ton y para 36,3 ton desciende a 13,89 ton, valor que es superado por los Hydrabolt.

Tabla73

Capacidad de Anclaje de los Pernos en Función del Diámetro de Tubos Simuladores para 4 pies de LEA

Diámetro interior del tubo simulador (mm)	Capacidad de anclaje para LEA = 4 pies (ton)				
	Split Set	Barra Helicoidal con Cartucho de Cementicio	Barra Helicoidal con Lechada de Cemento	Hydrabolt	Swellex (X-Pandabolt)
32,50		21,67	21,33	13,32	8,33
36,30		13,89	11,66	15,23	13,80
37,30	7,44				
38,14	6,95				
38,30	5,95	17,37	17,37	15,23	15,23
40,96				15,23	15,23
42,00		21,34	19,85		

Fuente: Elaboración propia.

Asimismo, para el caso de los pernos inflables, su capacidad de anclaje tiene un comportamiento inverso al de las barras helicoidales. Es decir, se muestra creciente como aumenta el diámetro de tubo simulador, tal es así que por ejemplo para los pernos Hydrabolt,

teniendo una capacidad de anclaje de 13,32 ton para 32,5 mm, para 38,3 mm alcanzan 15,23 ton; similares comportamientos muestran los X-Pandabolt.

Aquí también se concluye que el diámetro óptimo para instalar las barras helicoidales es 32,5 mm (33 mm), para los pernos inflables Hydrabolt y X-Pandabolt 38,3 y 40,96 mm respectivamente y para los Split Sets 37 mm; siendo la LEA de 4 pies.

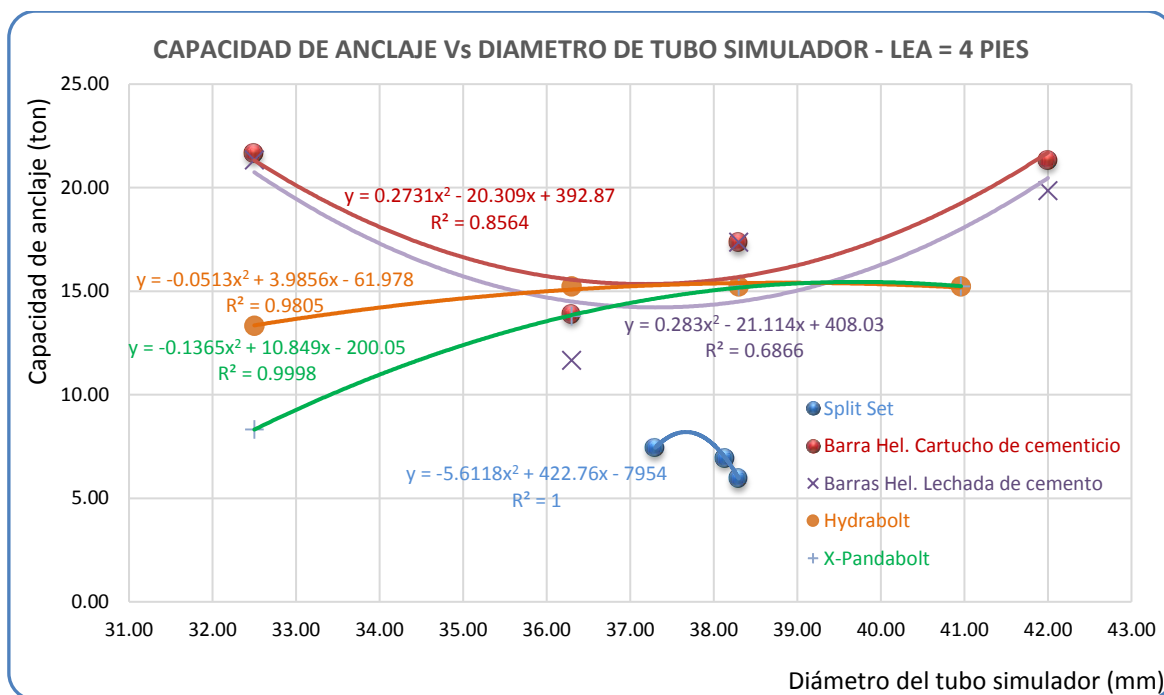


Figura 216. Capacidad de Anclaje de los Pernos de Roca Vs Diámetro de Tubo Simulador para 4 pies de LEA  
Fuente: Elaboración propia.

**D) Para las 4 longitudes efectivas de anclaje ensayados.** La tabla 74 presenta en resumen la capacidad de anclaje de los pernos estudiados, cuyos valores se han graficado en la figura 217, para visualizar mejor su correspondencia con el diámetro de tubo simulador para las diferentes LEAs estudiadas. En estos resultados se observa que el perno que muestra mayor capacidad de anclaje es la combinación de la barra helicoidal con lechada de cemento instalada en tubo en tubo simulador de 32,5 mm (33 mm). En general, el diámetro óptimo de tubo simulador (taladro) para instalar las barras helicoidales es 32,5 mm (33 mm), puesto que, al incrementar el diámetro, su capacidad de anclaje cae en todos los casos, que podrían agruparse en 3 niveles: alto, medio y moderado.

Una combinación que muestra alto descenso en su capacidad de anclaje, es la barra helicoidal instalada con lechada de cemento y 2 pies de LEA, que siendo su capacidad de anclaje 22,17 ton para 32,5 mm de diámetro, desciende a 7,94 ton al incrementar el diámetro a 36,3 mm. Otras combinaciones que muestran alta caída de su capacidad de anclaje son:

barras helicoidales, para 1 pie de LEA siendo el material de acoplamiento cartucho de cementicio y lechada de cemento; para 2 pies de LEA siendo el mortero lechada de cemento y los Split Sets.

Descenso medio en su capacidad de anclaje, muestran las siguientes combinaciones de pernos: barras helicoidales instaladas con cartucho de resina para 1 pie de LEA, con cartucho de cementicio y 2 pies de LEA y con lechada de cemento y 4 pies de LEA. Como ejemplo de este nivel de caída de la capacidad de anclaje es la barra helicoidal instalada con cartucho de cementicio para 2 pies de LEA, donde para 32,5 mm de diámetro de tubo simulador muestra una capacidad de anclaje de 20,83 ton mientras que cuando el diámetro aumenta a 36,3 mm cae a 9,59 ton.

Los casos que muestran una caída moderada en su capacidad de anclaje son las siguientes combinaciones de barras helicoidales con: Cartucho de resina con 3 pies de LEA, lechada de cemento de 3 pies de LEA, Cartucho de cementicio 3 pies de LEA, Cartucho de resina con 2 pies de LEA y cartucho de cementicio con 4 pies de LEA. Un ejemplo de este caso es la barra helicoidal instalada con cartucho de cementicio con 4 pies de LEA, combinación que para 32,5 mm muestra una capacidad de anclaje de 21,67 ton, que al aumentar el diámetro a 36,3 mm cae a 13,83 ton.

Asimismo, los pernos inflables muestran un comportamiento distinto que las barras helicoidales, ya que como puede observarse en la figura 217, sus capacidades de anclaje crecen como aumenta el diámetro del tubo simulador (taladro). Para estos pernos también podrían agruparse en 3 niveles el crecimiento de sus capacidades de anclaje como: alto, medio y moderado.

Las combinaciones de pernos inflables que muestran alto crecimiento en su capacidad de anclaje, están: X-Pandabolt de 1, 2 y 3 pies de LEA. Como ejemplo se puede citar al X-Pandabolt de 3 pies de LEA, combinación que para 32,5 mm de tubo simulador muestra una capacidad de anclaje de 3,57 ton, la que al aumentar el diámetro a 40,96 mm alcanza 15,23 ton.

Los pernos Swellex (X-Pandabolt) con 4 pies de LEA y los Hydrabolt de 2 pies de LEA, muestran un aumento medio de sus capacidades de anclaje, siendo un ejemplo de este caso los Hydrabolt de 2 pies de LEA, que en tubos simuladores de 32,5 mm muestra una capacidad de anclaje de 9,52 ton, la que asciende a 15,23 ton en tubos simuladores de 38,3 mm.

Tabla 74

*Capacidad de Anclaje de los Pernos de Roca en Función del Diámetro del Tubo Simulador y Diferentes LEAs*

DTS (mm)	Capacidad de anclaje vs lea (ton)																						
	LEA = 1 PIE						LEA = 2 PIES						LEA = 3 PIES						LEA = 4 PIES				
	SS	Hy	x-p	BHCC	BHCR	BHLC	SS	Hy	x-p	BHCC	BHCR	BHLC	SS	Hy	x-p	BHCC	BHCR	BHLC	SS	Hy	x-p	BHCC	BHLC
32,50		9,52	1,43	15,88	19,85	17,37		9,52	2,38	20,83	21,25	22,17		11,42	3,57	21,00	21,00	21,00		13,32	8,33	21,67	21,33
36,30		9,52	4,76	7,94	11,91	7,19		13,32	6,34	9,59	16,87	7,94		13,32	9,52	13,89	17,37	17,37		15,23	13,80	13,89	11,66
37,30	2,71							4,96						5,95						7,44			
38,14	2,81							3,97						6,70						6,95			
38,30	1,65	9,52	6,50	3,97	9,92	5,62	3,97	15,23	12,13	11,25	11,91	7,94	3,80	15,23	14,27	13,89	10,92	10,92	5,95	15,23	15,23	17,37	15,23
40,96		11,42	8,41					13,32	13,32					15,23	15,23					15,23	15,23		
42,00				2,48	13,89	2,98				11,91	19,35	7,94				17,37	19,35	17,37				21,34	19,85

LEA = Longitud efectiva de anclaje. DTS = Diámetro de tubo simulador. Hy = Hydrabolt. X-P = X-Pandabolt. BHCC = Barra helicoidal con cartuchos de cementicio. BHCR = Barra helicoidal con cartuchos de resina. BHLC = Barra helicoidal con lechada de cemento. SS = Split Set.

Fuente: Elaboración propia.

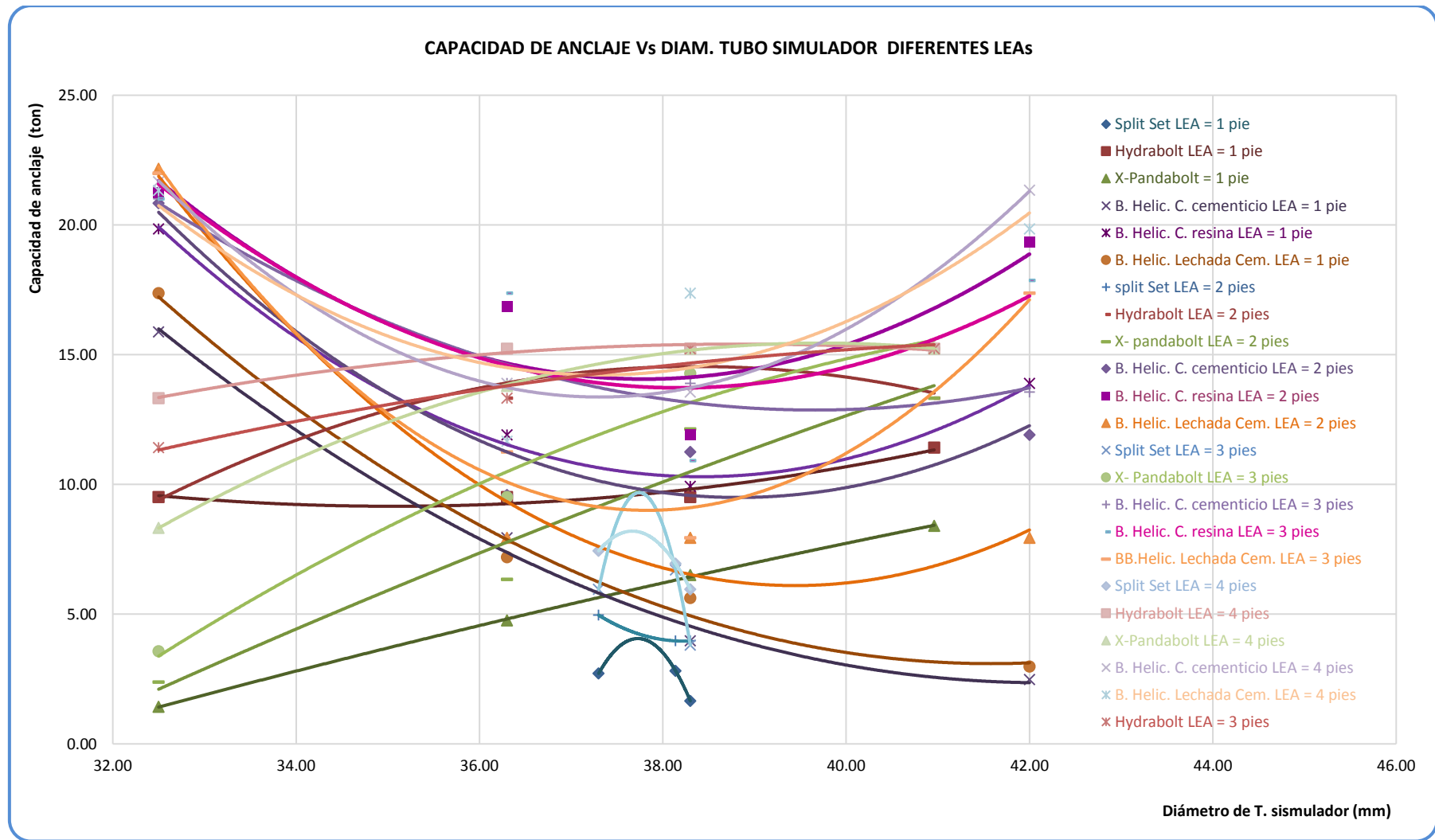


Figura 217. Capacidad de Anclaje de los Pernos de Roca en Función del Diámetro de Tubo Simulador y Diferentes LEAs  
Fuente: Elaboración propia.

Los pernos inflables Hydrabolt de 3 y 4 pies de LEA, son los que muestran un incremento moderado en su capacidad de anclaje. Como ejemplo se puede presentar a los Hydrabolt de 4 pies de LEA, que para 32,5 mm de diámetro de tubo simulador muestra una capacidad de anclaje de 13,32 ton, la que pasa a ser 15,23 ton en 38,3 mm de diámetro.

Los pernos Hydrabolt muestran mayor capacidad de anclaje que los X-Pandabolt, inclusive equiparable a la de las barras helicoidales para 38 mm de diámetro. El diámetro óptimo de para instalar los pernos Hydrabolt es 38,3 mm (38 mm), mientras que para los pernos X-Pandabolt 40,96 mm (41 mm). Asimismo, para los Split Sets es 37,3 mm (37 mm).

### **8.3.3 Elongación en función de la carga aplicada**

A) *para 1 pie de la longitud efectiva de anclaje.* La elongación en función de la carga aplicada durante los ensayos de arranque (pull test) de los pernos de roca instalados con 1 pie de LEA, ilustra la figura 218 elaborado en base a los datos presentados como modelo en los anexos del A-1 al A-6, donde se observa que los pernos que sufren mayor elongación son los Split Sets instalados en tubos simuladores de 38,3 mm (39 mm); seguido por las barras helicoidales instaladas con cartuchos de cementicio en tubos simuladores de 42 y 36,3 mm (36 mm).

Asimismo, los pernos que muestran menor elongación, son las barras helicoidales instaladas con lechada de cemento en tubo simulador de 42 mm, seguido por la barra helicoidal instalada con cartuchos de cementicio en tubos de 38,3 mm y los Hydrabolt en tubo de 36 mm.

Para cargas comunes de 2, 4 y 6 ton de carga, se tienen las siguientes elongaciones mínimas y máximas: para 2 ton de carga, Las Barras helicoidales instaladas con lechada de cemento en tubo simulador de 42 mm muestran 0,047 mm de elongación, mientras que los Split Sets instalados en tubos simuladores de 39 mm muestran 2,63 mm de elongación. Para 4 ton de carga, la barra helicoidal instalada con lechada de cemento en tubos simuladores de 42 mm, alcanza 0,094 mm de elongación y la barra helicoidal instalada con cartuchos de cementicio en tubos simuladores de 36,3 mm alcanzan 1,83 mm. Para el caso de 6 ton de carga, el perno inflable Hydrabolt instalado en tubo simulador de 36,3 mm sufre una elongación de 0,95 mm y la barra helicoidal instalado con cartuchos de resina en tubos simuladores de 36,3 mm alcanzan una elongación de 2,75 mm.

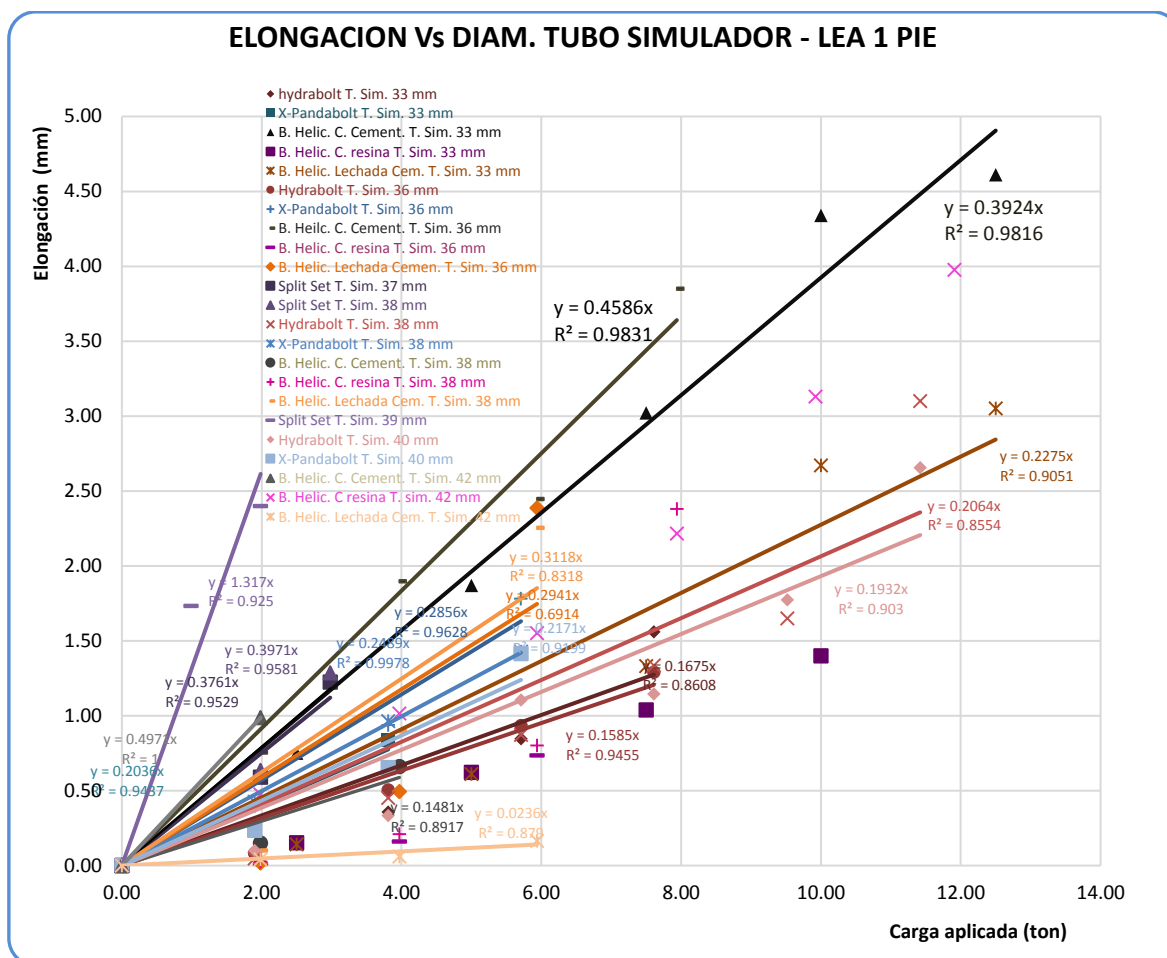


Figura 218. Elongación de los Pernos de Roca Vs Carga Aplicada para 1 pie de LEA y Diferentes Diámetros de Tubos Simuladores

Fuente: Elaboración propia.

**B) Para 2 pies de la longitud efectiva de anclaje.** Para esta longitud efectiva de anclaje, la alternativa de perno que muestra mayor elongación en la barra helicoidal instalada con lechada de cemento en tubo simulador de 42 mm, seguido por los Split Sets instalados en tubos de 38,14 mm (38 mm), como ilustra la figura 219. Por el contrario, muestran menor elongación los pernos Hydrabolt instalados en tubos simuladores de 33 mm, seguido por las barras helicoidales instaladas con cartuchos de cementicio en tubos simuladores de 32,5 (33 mm) mm.

Para cargas de 2, 4, 6 ton, los pernos sufren elongaciones mínimas y máximas, como sigue: Para 2 ton, los Hydrabolt instalados en tubos simuladores de 33 mm alcanzan 0,34 mm de elongación; mientras que las barras helicoidales instaladas con lechada de cemento en tubos de 42 mm; 1,5 mm. Para 4 ton de carga, los pernos Hydrabolt instalados en tubos simuladores de 33 mm alcanzan una elongación de 0,67 mm y las barras helicoidales instaladas con cartuchos de cementicio en tubos de 42 mm, 2,90 mm. Para 6 ton de carga,



los pernos que sufren menor elongación son los Hydrabolt instalados en tubos simuladores de 32,5 mm que alcanzan 1,00 mm, mientras que mayor elongación muestran las barras helicoidales instaladas con cartuchos de cementicio en tubos de 42 mm.

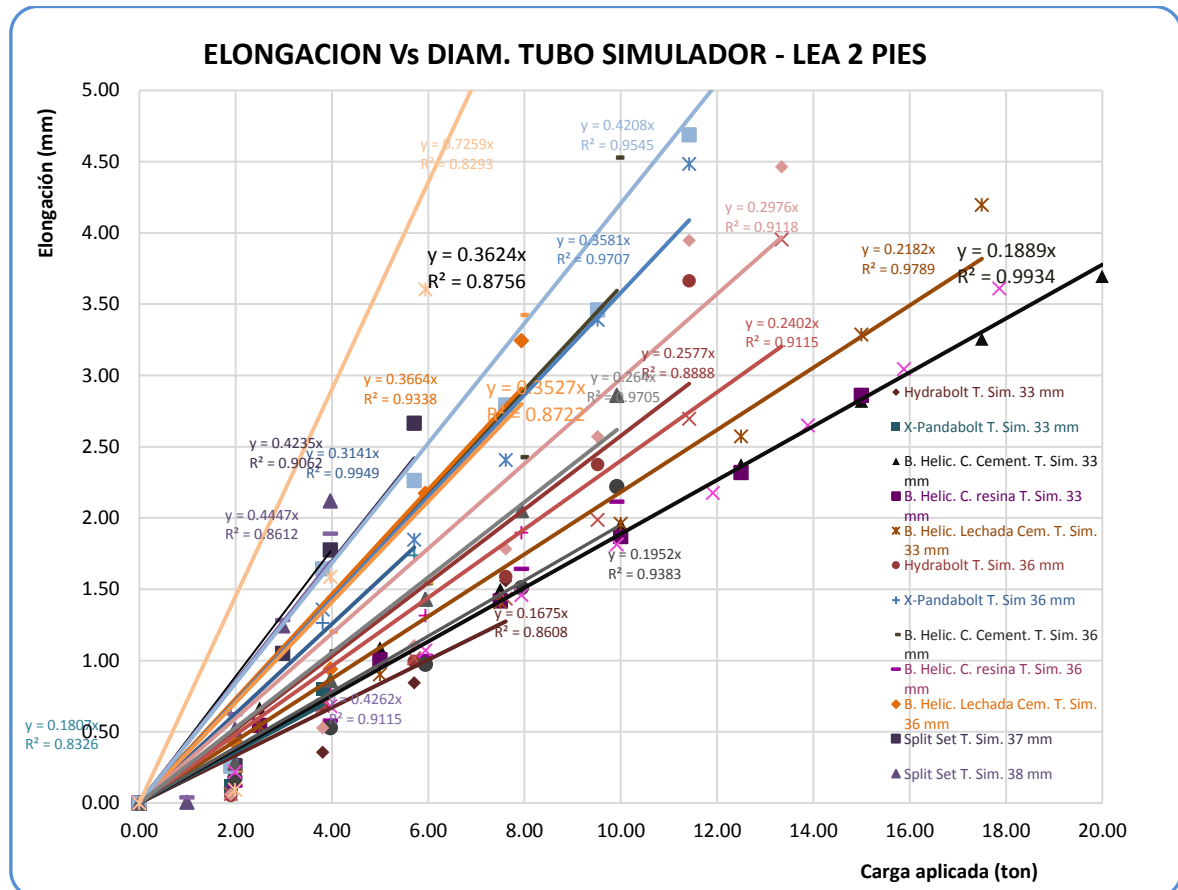


Figura 219. Elongación de los Pernos de Roca Vs Carga Aplicada para 2 pies de LEA y Diferentes Diámetros de Tubos Simuladores

Fuente: Elaboración propia.

**C) Para 3 pies de la longitud efectiva de anclaje.** En este caso, como puede apreciarse en la figura 220, los pernos que muestran mayor elongación son los Split Sets instalados en tubos simuladores de 38,14 mm (38 mm), seguidos por los instalados en tubos de 37,3 mm. Por el contrario, los pernos que muestran menor elongación son los pernos inflables Hydrabolt instalados en tubos simuladores de 32,5 mm seguido por los X-Pandabolt instalados en tubos del mismo diámetro.

Haciendo un análisis para cargas de 4, 8 y 12 ton, se aprecian las siguientes elongaciones mínimas y máximas: Para 4 ton de carga, los pernos que muestran menor elongación son los Hydrabolt instalados en tubos simuladores de 32,5 mm (33 mm) que alcanza 0,42 mm y los que mayor elongación alcanzan son los Split Sets en tubos de 38,14 mm (38 mm). Análogamente, para 8 ton de carga, las barras helicoidales instaladas con lechada de cemento en tubos simuladores de 32,5 mm alcanzan una elongación de 1,47 mm

y el máximo los pernos inflables X-Pandabolt instalados en tubos de 38,3 mm (38 mm) con un valor de 3,20 mm.

Para la carga aplicada de 12 ton, las barras helicoidales instaladas con lechada de cemento en tubos simuladores de 32,5 mm (33 mm), son las que muestran menor elongación con un valor de 2,2 mm y mayor elongación muestran los pernos inflables X-Pandabolt que alcanzan 4,8 mm.

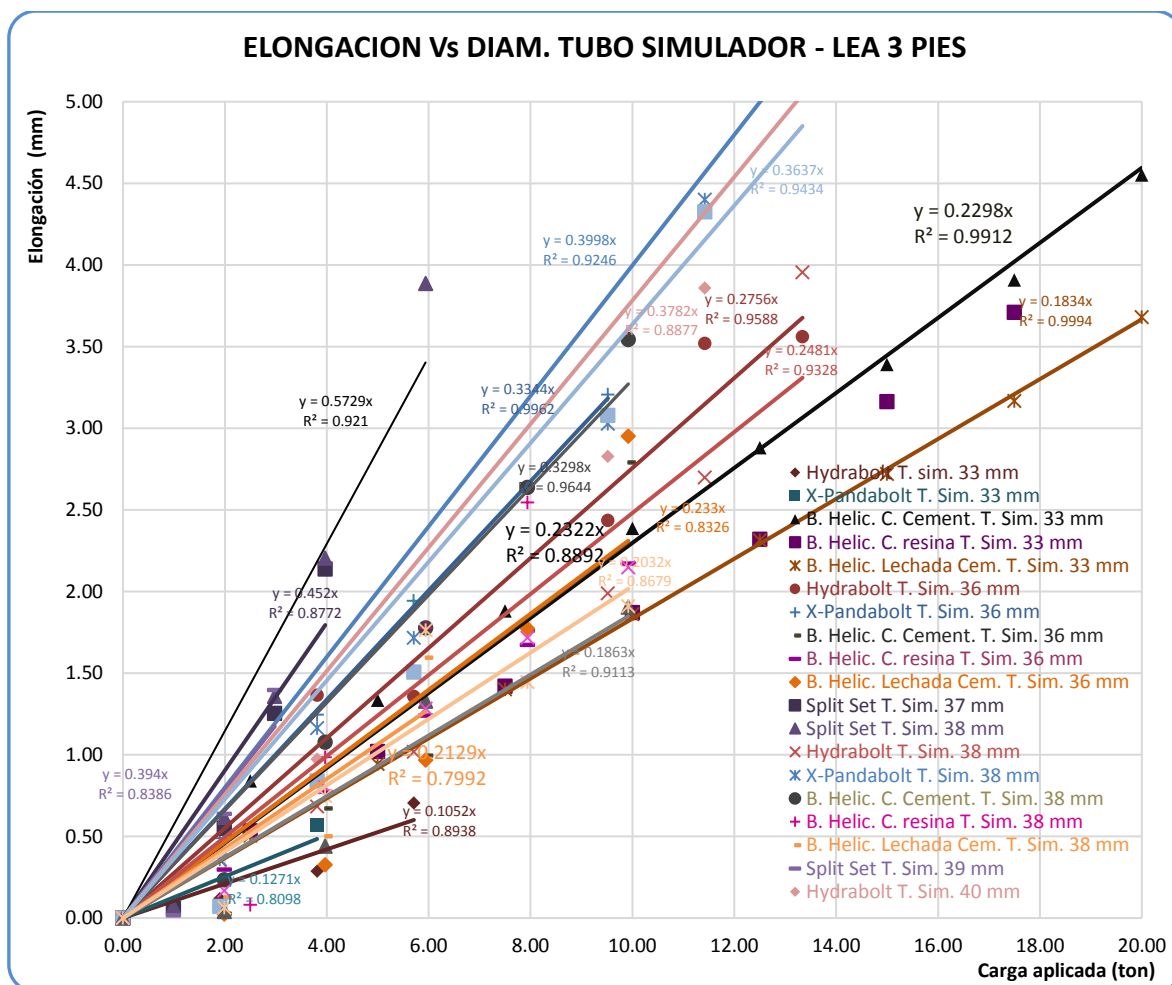


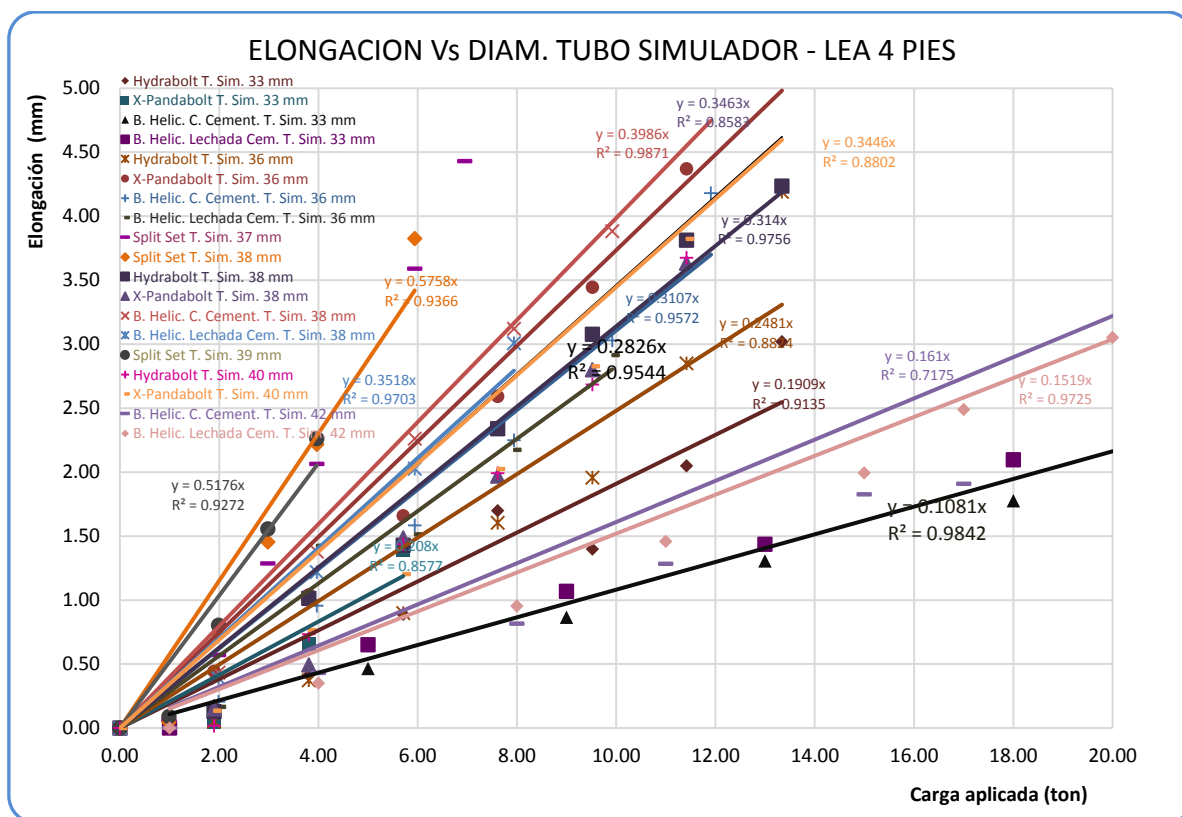
Figura 220. Elongación de los Pernos de Roca Vs Carga Aplicada para 3 pies de LEA y Diferentes Diámetros de Tubos Simuladores

Fuente: Elaboración propia.

**D) Para 4 pies de la longitud efectiva de anclaje.** Como puede observarse en la figura 221, los pernos que más elongación muestran son los Split Sets instalados en tubos simuladores de 38,14 mm (38 mm) y 38,3 mm (39 mm). Los pernos que muestran menor elongación son las barras helicoidales instaladas con cartuchos de cementicio en tubos simuladores de 32,5 mm, secundados por las mismas barras instaladas con lechada de cemento en tubos simuladores de 42 mm.

Analizando como ejemplos, igual que para las otras LEAs, para las cargas aplicadas de 2, 6 y 10 ton, los valores mínimos y máximos de elongación muestran las siguientes combinaciones: Para 2 ton de carga, las barras helicoidales instaladas con cartuchos de cementicio en tubos simuladores de 32,5 mm alcanzan una elongación de 0,22 mm, mientras que los Split Sets instalados en tubos de 38,14 mm 1,15 mm.

Analizando para 6 ton de carga, se observa que las barras helicoidales instaladas con cartuchos de cementicio en tubos simuladores de 32,5 mm muestran una elongación de 0,65 mm, mientras que los Split Sets instalados en tubos de 38,14 mm; 3,45 mm. Asimismo, para una carga de 10 ton, los pernos que menor elongación muestran son las barras helicoidales instaladas en tubos simuladores de 32,5 mm con 1,1 mm mientras que las mismas barras instaladas y con los mismos cartuchos en tubos simuladores de 38,14 mm; 4,0 mm.



**Figura 221.** Elongación de los Pernos de Roca Vs Carga Aplicada para 4 pies de LEA y Diferentes Diámetros de Tubos Simuladores

Fuente: Elaboración propia.

#### **8.4 Análisis Comparativo de las Capacidades de Anclaje de los Pernos de Roca Estudiados en la Mina Castrovirreyna y en Laboratorio**

Este análisis se realiza con la finalidad de comparar las capacidades de anclaje mostrado por los pernos de roca instalados en tubos simuladores con las obtenidas en el estudio realizado en la unidad minera Reliquias de la Cía. Minera Castrovirreyna (terreno real). Cabe destacar que, el estudio de pernos en Castrovirreyna, se realizó en diámetros únicos recomendados por los fabricantes y proveedores de pernos, como los diámetros ideales para instalar sus pernos, tal es así que, las barras helicoidales se ensayaron en taladros perforados con diámetro de 36 mm e instalados con cartuchos de cementicio y resina. Asimismo, los pernos inflables Hydrabolt y Swellex (este último, similar al X-Pandabolt) y los Split Sets, se ensayaron en taladros de 38 mm. Las longitudes efectivas de anclaje estudiadas, tanto en el laboratorio como en la mina Reliquias fueron de 1, 2, 3 y 4 pies

No obstante que el estudio en el laboratorio se llevó a cabo con 4 tamaños de diámetros de tubos simuladores, para el presente análisis solamente se está considerando iguales diámetros a los utilizados en la mina Castrovirreyna, a fin que el análisis de los resultados obtenidos tanto en el laboratorio como en el campo, reflejen equidad. Sin embargo, cabe recalcar que, los tubos simuladores tienen un comportamiento de la mejor roca que puede existir en la naturaleza (roca clase I,  $RMR = 100$ ); mientras que en la mina Reliquias, según el reporte del Departamento Geomecánico de la Cía. el terreno fue clase III ( $RMR = 48$ ). Sin embargo, el tramo de hastial del crucero 752 del nivel 642, zona estéril de la Veta Matacaballo donde se llevaron los ensayos no primó únicamente dicha clase de roca, sino en unos tramos primaron rocas más homogéneas que en otros, por tal razón, los resultados obtenidos en el laboratorio para algunos pernos difieren mucho de los obtenidos en la mina. Justamente, uno de los objetivos de realizar este estudio utilizando tubos simuladores, es evaluar la capacidad de anclaje de los pernos bajo las mismas condiciones de terreno.

**8.4.1 Capacidad de anclaje de las barras helicoidales instalados en tubos simuladores o taladros de 36 mm.** Según los fabricantes y proveedores, el diámetro ideal de los taladros para instalar las barras helicoidales sería 36 mm. Por tal motivo, el estudio en la Mina Reliquias se llevó a cabo con este diámetro, y, habiendo realizado el estudio en laboratorio con diámetro de 36,3 mm (36 mm), se hace el análisis comparativo en ambos

resultados, cuyos valores promedios en resumen se presenta en la tabla 75. Cabe destacar que, como los ensayos en la mina Reliquias se llevaron a cabo con barras helicoidales instaladas con cartuchos de cementicio y resina, se considera únicamente estas dos alternativas de material de acoplamiento, toda vez que en el laboratorio se ensayaron también con lechada de cemento.

Como puede observarse en la figura 222, las barras helicoidales instaladas con cartuchos de resina en tubos simuladores muestran mayor capacidad de anclaje que la mostrada por las instaladas en taladros (mina Castrovirreyna). Asimismo, las barras helicoidales instaladas en taladros, muestran una capacidad muy irregular, pues si se observa en la tabla 75, 1 pie de LEA alcanzó una capacidad de anclaje de 1,13 ton y para 3 pies de LEA 14,63 ton; mientras que para las mismas LEAs en tubos simuladores se obtuvo 11,91 y 17,37 ton, respectivamente.

Tabla75

*Capacidad de Anclaje Comparativa de las Barras Helicoidales Instaladas en Taladros (mina) y Tubos Simuladores (laboratorio) de 36 mm de Diámetro Vs LEA*

LEA (pies)	Capacidad de anclaje en tubo simulador o taladro de 36 mm (ton)			
	Barra Helicoidal instalado con cartucho de cementicio		Barra Helicoidal instalado con cartucho de resina	
	Tubo simulador	Mina Castrovirreyna	Tubo simulador	Mina Castrovirreyna
1	7.94	10.50	11.91	1.13
2	9.59	8.00	16.87	4.31
3	13.89	14.00	17.37	14.63
4	13.89	12.25		15.75

Fuente: Elaboración propia.

En caso de las barras helicoidales instaladas con cartuchos de cementicio, se tiene que para las instaladas en taladros en la mina Reliquias, se muestra muy irregular, comparada con las instaladas en tubos simuladores. Tal es así que, en la tabla 75 se puede destacar que, para 1 pie de LEA en taladro, estas barras muestran una capacidad de anclaje de 10,50 ton, pero para 2 pies, 8,0 ton; luego para 3 pies vuelve a subir a 14,00 y para 4 pies vuelve a descender. Mientras que, para las barras instaladas en tubos simuladores, la capacidad de anclaje se muestra creciente siempre, por ejemplo, para 1 pie de LEA muestra 7,94 ton, para 2 pies 9,59 ton y para 3 y 4 pies 13,89 ton.

Cabe reiterar que, la variación de la capacidad de anclaje mostrada por las barras helicoidales, se debe básicamente a la homogeneidad del terreno, sobre todo en el caso de las instaladas con cartucho de resina. Para el caso de las barras helicoidales instaladas con cartuchos de cementicio, las capacidades de anclaje obtenidas son más similares que para

las instaladas con resina, lo cual quiere decir que las barras instaladas con cartuchos de cementicio, se posicionaron en mejor terreno que las instaladas con resina.

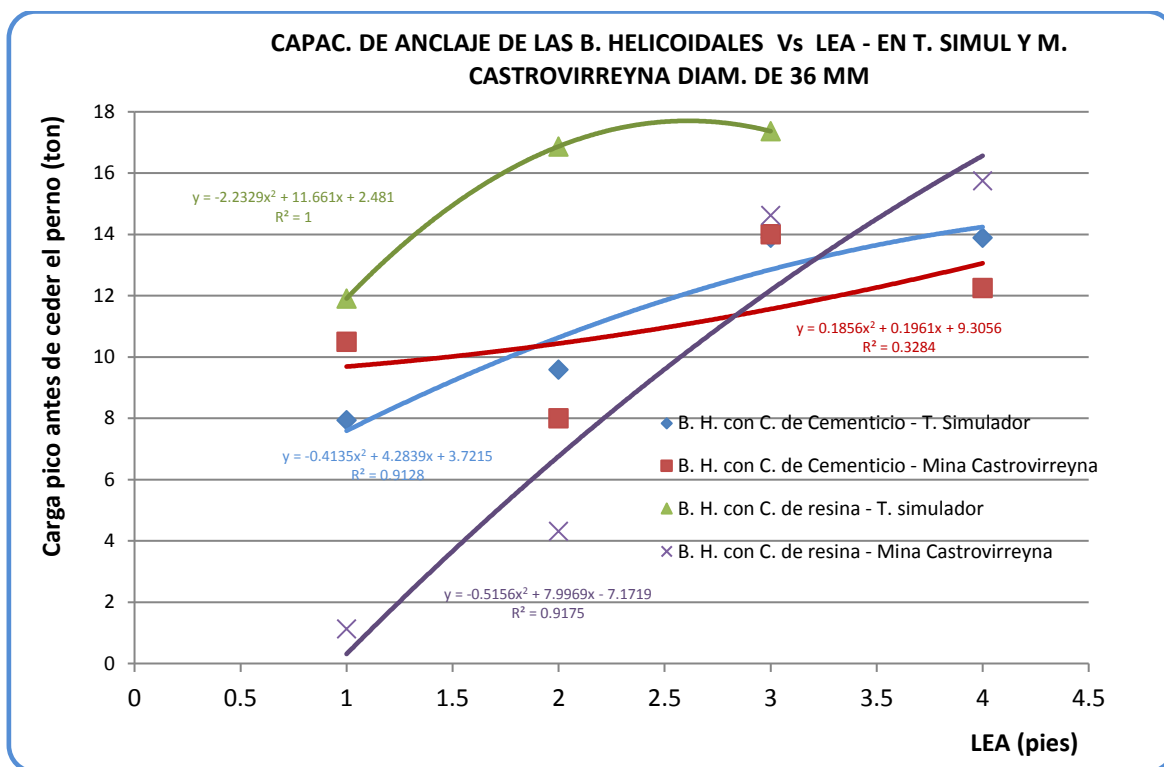


Figura 222. Capacidad de Anclaje de las Barras Helicoidales en Taladros (mina) y Tubos Simuladores (laboratorio) de 36 mm en Función de la LEA

Fuente: Elaboración propia.

**8.4.2 Capacidad de anclaje de distintos pernos instalados en tubos simuladores o taladros de 38 mm.** En este tamaño de diámetro de taladro o tubo simulador, se estudiaron los siguientes pernos de roca: Split Set, Hydrabolt, X-Pandabolt y Swellex, tanto en la mina como en el laboratorio. En la tabla 76 se aprecia que los resultados obtenidos en el laboratorio son bastante similares a los de la mina. Por ejemplo, los Split Sets, mostraron una capacidad de anclaje ligeramente superior cuando se instalaron en tubos simuladores (laboratorio), como puede constatarse en la tabla 76 y la figura 223; asimismo, las curvas de tendencia tienen el mismo comportamiento en ambos casos.

Para el caso del perno inflable Hydrabolt, mostró mayor capacidad de anclaje en la mina que en el laboratorio, pero en ambos casos creciente como fue incrementándose la LEA hasta 3 pies, a partir de la cual se torna asintótica, este resultado confirma una vez más, que la LEA ideal para este perno sería 3 pies y con capacidades muy similares de 15,23 ton en el laboratorio y 16 ton en la mina.

Como se ha indicado anteriormente, los pernos X-Pandabolt son idénticos a los Swellex, dado que siendo ambos inflables, luego de inflarse hasta 25 ó 30 MPa de presión, ésta se descarga quedando su interior a la presión atmosférica. Como ilustra la figura 223, mostraron mayor capacidad de anclaje en el laboratorio que en los ensayos en la mina, pero creciente como aumenta la LEA, por ejemplo, para 1 pie de LEA, mostraron 8,41 y 6,75 ton de capacidad de anclaje en el laboratorio y mina, respectivamente; mientras que, para 4 pies de LEA, las capacidades de anclaje fueron respectivamente, 15,23 y 14,25 ton. Asimismo, Para los ensayos en el laboratorio, la LEA ideal es 3 pies y en la mina 4 pies.

Tabla 76

*Capacidad de Anclaje Comparativa de Pernos de Roca Instalados en Taladros (mina) y Tubos Simuladores (laboratorio) de 38 mm de Diámetro Vs LEA*

LEA (pies)	Capacidad de anclaje de distintos pernos instalados en tubos o taladros de 38 mm					
	Split Set		Hydrabolt		X-Pandabolt	Swellex
	En tubo simulador	Taladro en Castrovirreyna	En tubo simulador	Taladro en Castrovirreyna	En tubo simulador	Taladro en Castrovirreyna
1	2.81	2.25	9.52	13.50	8.41	6.75
2	3.97	3.75	15.23	15.75	13.32	11.00
3	6.70	4.50	15.23	16.25	15.23	12.25
4	6.95	6.00	15.23	16.00	15.23	14.25

Fuente: Elaboración propia.

**8.4.3 Capacidad de anclaje de distintos tipos de pernos ensayados en el laboratorio y la mina Castrovirreyna.** Los diámetros comunes estudiados tanto en la mina como en laboratorio, fueron de 36 y 38 mm. En diámetro de 36 mm, se estudiaron las barras helicoidales instaladas con cartuchos de resina y cementicio, mientras que en diámetro de 38 mm se ensayaron los siguientes pernos: Split Sets, Hydrabolt, X-Pandabolt y Swellex. La tabla 77 presenta en resumen los resultados de los ensayos en realizados en mina y laboratorio, valores que para mejor visualización se presenta en la figura 224.

La alternativa que presenta mayor capacidad de anclaje, es la barra helicoidal instalada con cartuchos de resina en el laboratorio, alcanzando 17,37 ton para 3 pies de LEA y con un comportamiento ascendente y uniforme. Sin embargo, en la mina mostró un comportamiento muy irregular, como puede apreciarse en la tabla 77 y la figura 224, por ejemplo, para 1 pie de LEA alcanzó 1,13 ton mientras que para 2 pies 4,31 y para 3 pies 14,63 ton. Asimismo, los resultados de laboratorio indican que su capacidad de anclaje se muestra ascendente hasta 2,5 pies de LEA, como se ha discutido oportunamente, mientras que en mina se muestra ascendente hasta más allá de los 4 pies de LEA.



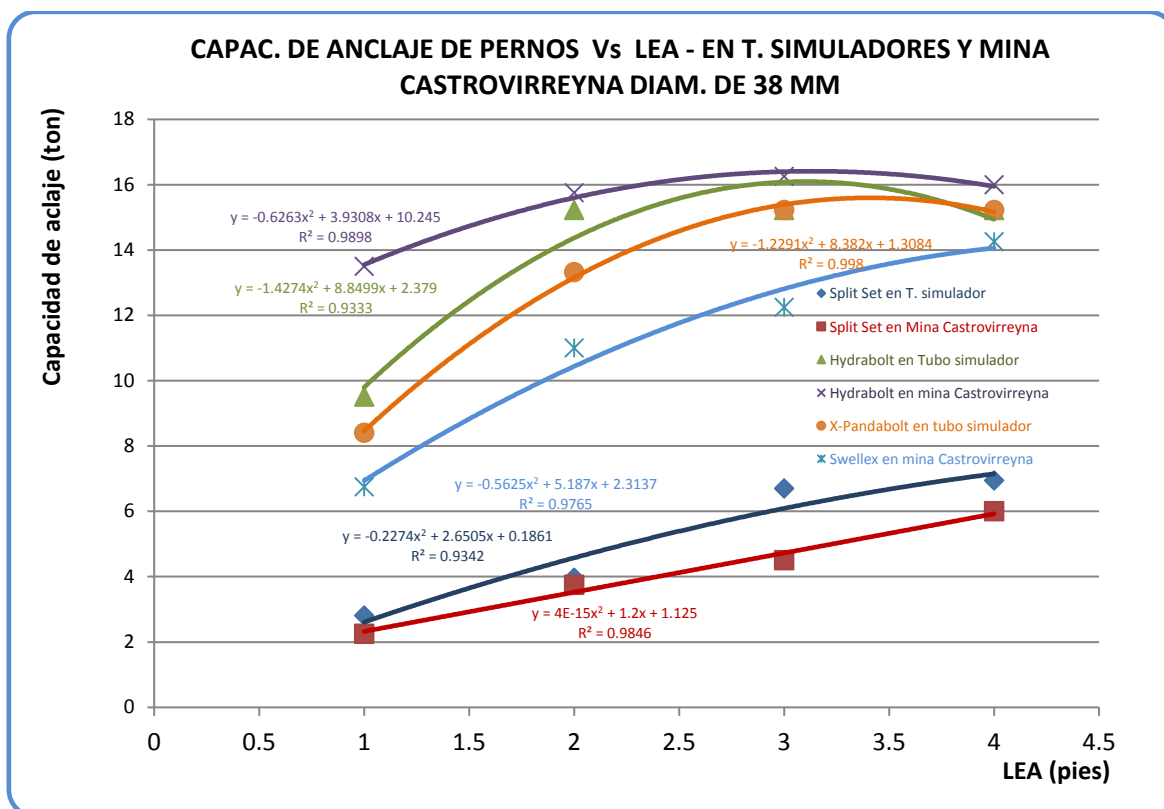


Figura 223. Capacidad de Anclaje de Pernos de Roca Instalados en Taladros y Tubos Simuladores de 38 mm en Función de la LEA

Fuente: Elaboración propia.

En segundo orden de mayor capacidad de anclaje, se posicionan los pernos inflables Hydrabolt ensayados en la Mina Castrovirreyna, seguido por los mismos pernos ensayados en el laboratorio, en ambos casos ascendente hasta 3 pies de LEA. La combinación que muestra menor capacidad de anclaje son los Split Sets ensayados en la mina, seguido por el mismo perno ensayado en el laboratorio, pero con valores bastante similares para cada LEA ensayada.

De la figura 224 se colige que, la capacidad de anclaje mostrada por los pernos en los ensayos de laboratorio, son similares a los obtenidos en la mina, cuando el tipo roca es muy buena, cuya condición representan los tubos simuladores.

Tabla 77

Capacidad de Anclaje de Distintos Tipos de Pernos de Roca en Diámetros de 36 y 38 mm Tanto en el Laboratorio como en la Mina

LEA (pies)	Diámetro 38 mm						Diámetro 36 mm			
	Split Set		Hydrabolt		X-Pandabolt		Swelllex		B. Helicoidal con C. de cementicio	Barra Helicoidal con C. cartucho de resina
	Laborato	Mina	Laboratorio	Mina	Laboratorio	Mina	Laboratorio	Mina	Laboratorio	Mina
1	2.81	2.25	9.52	13.50	8.41	6.75	7.94	10.50	11.91	1.13
2	3.97	3.75	15.23	15.75	13.32	11.00	9.59	8.00	16.87	4.31
3	6.70	4.50	15.23	16.25	15.23	12.25	13.89	14.00	17.37	14.63
4	6.95	6.00	15.23	16.00	15.23	14.25	13.89	12.25		15.75

Fuente: Elaboración propia.

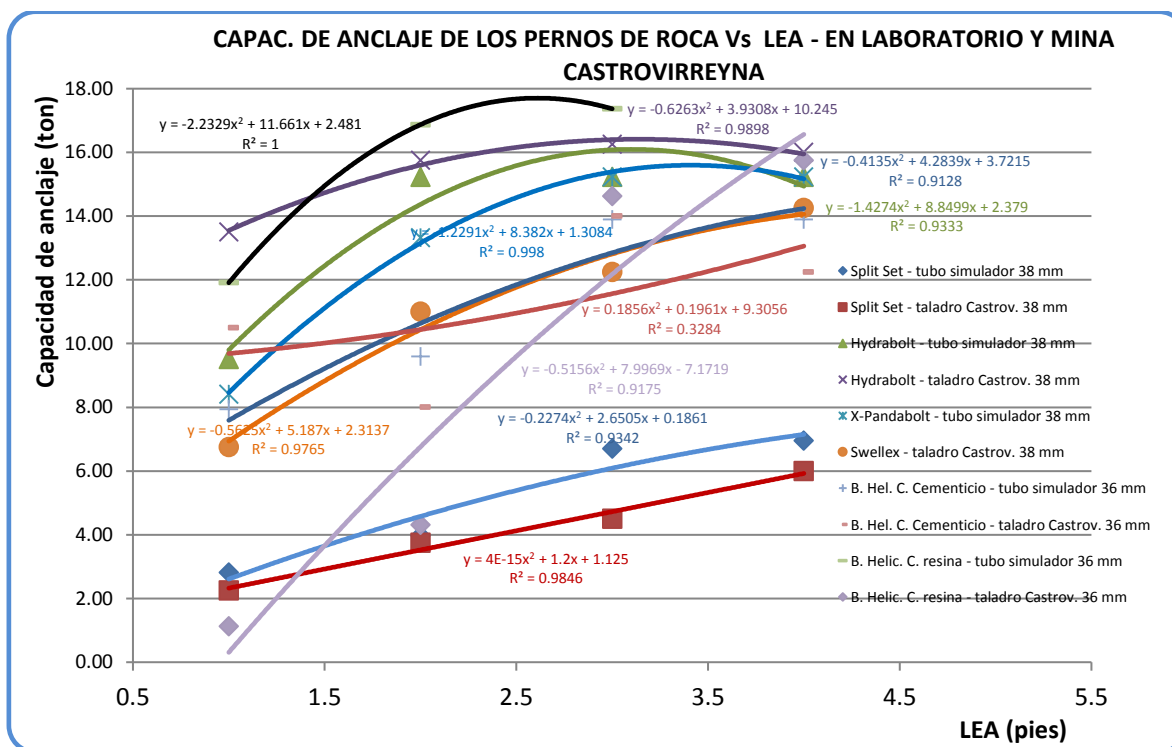


Figura 224. Capacidad de Anclaje de Pernos de Roca Instalados en Taladros (mina) y Tubos Simuladores (laboratorio) de 36 y 38 mm de Diámetro en Función de la LEA

Fuente: Elaboración propia.

## **Capítulo 9**

### **Discusión de Resultados de los Efectos Ambientales**

Con los resultados expuestos en el capítulo anterior, en cuanto a los diámetros óptimos y longitudes efectivas de anclaje óptimas y, los resultados de los estudios y análisis posteriores respecto a la demanda de pernos de roca en la minería subterránea nacional considerando tipos y tamaños utilizados, estudio de tiempos y movimientos de equipos tanto manual como mecanizado utilizados para la instalación de pernos, consumos de aire, agua, lubricantes, combustibles, energía, entre otros, a fin de determinar la reducción de las emisiones de agentes nocivos para el medio ambiente como el CO<sub>2</sub>, aceites, calor, entre otras, ocasionadas por la instalación de pernos de roca.

Para la instalación de pernos de roca, se utilizan dos métodos, manual y mecanizado. En la instalación manual, se usa un equipo neumático (jackleg) como instalador; mientras que, en el método mecanizado, se usa una perforadora hidráulica (jumbo) o propiamente un instalador de pernos de roca (Rock bolter). En la minería peruana se usan ambos métodos, durante el estudio ha sido difícil establecer el porcentaje de pernos que se instalan con uno u otro sistema, puesto que, hay mineras que usan bien el método manual o mecanizado o ambos métodos a la vez. Frente a esta incertidumbre, se hizo el análisis considerando dos escenarios, uno, que todos los pernos se instalan con equipo manual o en su defecto, con equipo mecanizado.

Entre otros aspectos efectos ambientales, se ha determinado las emisiones de dióxido de carbono, calor, aceites; consumos de combustible, agua, aire, etc. Los resultados de esta parte del estudio demuestran que, hay una reducción significativa de la emisión de contaminantes al medio ambiente y menor consumo de agua y aire, tan necesarios para la vida sobre la tierra.

Cabe destacar que, el análisis de los efectos ambientales por la reducción del número de pernos aplicados a raíz de la optimización del diámetro de taladros, se ha analizado para la minería subterránea peruana y únicamente relacionadas con su instalación, sin tener en cuenta otras fuentes de contaminación como el calor emitido por la penetración del elemento de corte (broca) en la roca, calentamiento de ventiladores que atañen a la instalación de

pernos, transpiración del personal, contaminación producida por el traslado y manipuleo de pernos en la mina, entre otros. Si se tomara en cuenta todas las fuentes de contaminación, y proyectando a la minería mundial, la reducción de la contaminación ambiental, resultaría potencialmente alto.

Asimismo, en el presente análisis no se está tomando en cuenta la reducción de la contaminación en toda la cadena de fabricación de pernos (fundición, rolado, soldadura, laminado, etc.), transporte y manipuleo en el país de origen (dado que la mayoría de los pernos son importados), transporte marítimo (consumo de combustible diésel), transporte y manipuleo en el país de destino, almacenaje, manipuleo, entre otros factores.

### **9.1 Determinación del Número de Pernos de Roca de Acuerdo a los Diámetros de Taladros Antes y Después de su Optimización**

Para determinar los efectos ambientales favorables de la optimización del diámetro de los taladros para instalar los pernos de roca, primero se procedió con determinar el número de pernos para ambas dimensiones de diámetro, actual y optimizado, asumiendo un área a sostener de 100 m<sup>2</sup>, una capa inestable de 1,0 m y una densidad de roca de 2,7 t/m<sup>3</sup> (2,98 ton/m<sup>3</sup>), como ilustra la tabla 78. Las capacidades medidas instrumentalmente, fueron ajustadas mediante un factor de seguridad de 1,5; con lo cual se determinaron los espaciamientos entre pernos.

La tabla 78, muestra que al optimizar el diámetro de los taladros donde se instalan los pernos de roca, hay una reducción del número de éstos; así por cada 100 m<sup>2</sup> de área sostenida resulta: para el caso de los Split sets, 17 (18 %); BHCC, 13 (29 %); BHCR, 5 (15 %), BHLC, 23 (43 %); para el caso de los pernos Hydrabolt, es el único perno que viene instalándose en diámetro ya óptimo, por lo que la reducción equivale a 0, y, para el Swellex (X-Pandabolt), 2 (5 %).

### **9.2 Demanda de Pernos en la Minería Subterránea Peruana**

Para cuantificar la magnitud de los efectos ambientales, también fue necesario determinar la demanda actual de pernos de roca en la minería peruana, para lo cual fue necesario investigar, sobre el tipo de perno y dimensiones (diámetro y longitud) que se aplican en la minería peruana, recurriendo a las empresas mineras y proveedores, estableciéndose que 45 unidades mineras agrupadas la mayoría de ellos en Cías. Mineras, aplican los pernos que ilustra la tabla 79, de donde se concluye que en la minería peruana se

aplican mensualmente 205401 Split Sets, 84893 barras helicoidales, 29200 pernos Swellex y 116850 Hydrabolt, totalizando 436344 pernos.

Tabla78

*Determinación de la Reducción Porcentual del Número de Pernos en Sostenimiento al Optimizar los Diámetros de los Taladros y en Función de las Longitudes Efectivas de Anclaje Optimas*

Perno	Split Set		BHCC*		BHCR*		BHLC*		Hydrabolt		Swellex	
LEA óptima (pies)	4		3		3		3		3		3	
Diámetro (mm)	Actual	Optimiz.	Actual	Optimiz.	Actual	Optimiz.	Actual	Optimiz.	Actual	Optimiz.	Actual	Optimiz.
	<b>38</b>	<b>37</b>	<b>36</b>	<b>32</b>	<b>36</b>	<b>32</b>	<b>36</b>	<b>32</b>	<b>38</b>	<b>38</b>	<b>38</b>	<b>41</b>
Capacidad de anclaje medido (CA) (ton)	5,95	7,44	13,89	21	17,37	21	11,25	22	15,23	15,23	14,27	15,23
Capacidad de anclaje ajustado al factor de seguridad 1,5 (CA' = CA/1,5) (ton)	3,97	4,96	9,26	14,00	11,58	14,00	7,50	14,67	10,15	10,15	9,51	10,15
Potencia de la capa inestable (h) (m)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Densidad de la roca ( $\rho$ ) (ton/m3)	2,98	2,98	2,98	2,98	2,98	2,98	2,98	2,98	2,98	2,98	2,98	2,98
Espaciamiento entre pernos (d) (m):	1,15	1,29	1,76	2,17	1,97	2,17	1,59	2,22	1,85	1,85	1,79	1,85
Considerando área a sostener (A) (m2)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Número de pernos requeridos (NP):	93	77	44	31	37	31	53	30	41	41	43	41
Reducción del número de pernos por cada 100 m2 de área sostenida	17		13		5		23		0		2	
<b>Reducción porcentual (%)</b>	<b>18</b>		<b>29</b>		<b>15</b>		<b>43</b>		<b>0</b>		<b>5</b>	

\*BHCC = Barra helicoidal instalada con cartuchos de cementicio. BHCR = Barra helicoidal instalada con cartuchos de resina. BHLC = Barra helicoidal instalada con lechada de cemento

Fuente: Elaboración propia.

Por la complejidad del análisis y a fin que los resultados reflejen las ventajas ambientales de la optimización de los diámetros de los taladros donde se instalan los pernos de roca, se hizo un análisis de las longitudes de pernos que se aplican en la minería peruana (0,3; 0,6; 0,9; 1,2; 1,5; 1,8; 2,1; 2,25; 2,4 y 3,0 m) a fin de determinar la de mayor aplicación en nuestro país, el resultado de este análisis, demuestra que la longitud de pernos de mayor demanda es la de 2,1 m (7 pies), como ilustra la figura 225, con los siguientes porcentajes Split set, 76 %; Barras helicoidales, 61,4 %; Swellex, 100% e Hydrabolt, 91.8 %; siendo el promedio ponderado de 79 %. Por consiguiente, los análisis siguientes sobre los efectos ambientales favorables que propiciaría la optimización de los diámetros de taladros para instalar los pernos de roca, se llevaron a cabo con longitudes de pernos de 2,1 m.

Tabla79  
*Demanda Mensual de Pernos de Roca en la Minería Subterránea Peruana*

Num.	Compañía Minera	UINDAD SUBTERRANEA	Demanda mensual de pernos				Totales por Cía.
			Split Set	Barras helicoidales	Swellex	Hydrabolt	
1	Cía. De Minas Buenaventura S. A.	Tambomayo	57500	5000		55000	117500
2		Uchucchacua					
3		Julcani					
4		Marcapunta					
5		Orcopampa					
6	Cía. Minera Milpo SAA (ahora: NEXA Resources Perú S.A.A.)	Cerro Lindo	28000	13500		3500	45000
7		Porvenir					
8		Atacocha					
9	Sociedad Minera Corona S. A.	Yauricocha	20000	2700			22700
10	Empresa Minera Los Quenuales S. A.	Iscaycruz	21355	2070		3500	26925
11		Yauliyacu					
12		Contonga					
13	Cía. Minera Raura S. A.	Raura	15000	1000		3750	19750
14	Catalina Huanca Sociedad Minera SAC	Catalina H.	13000	2152			15152
15	San Ignacio de Morococha S.A.	SIMSA	7000				7000
16	Sociedad Minera Lincuna S.A.	Huancapetí	7250	2000			9250
17	Sociedad Minera El Brocal SAA	El Brocal	5000		8000		13000
18	Volcan Cía. Minera S.A.	San Cristobal	5000	3000		37000	45000
19		Çandaychagua					
20		Ticlio					
21		Carahuacra					
22		Animón					
23		Islay					
24		Rio Pallanga					
25	Paragsha						
26	Minera Aurífera Retamas S.A.	MARSA	6633	3578			10211
27	Gestión Minera Integral SAC	Casapalca	4300	5060			9360
28	Pan American Silver Huaron S.A.	Argentum	4500				4500
29		Quiruvilca					
30		Morococha					
31		Huaron					
32	Sociedad Minera Austria Duvaz SAC	Austria Duvaz	4250	1500		1600	7350
33	Administración de Empresas SAC - Minsur	San Rafael	3555	17575			21130
34	Minera Sotrami S.A.,	Sotrami	1550				1550
35	Cía. Miera Poderosa S.A.	Poderosa	1358	14836			16194
36	Cía. Minera Shuntur	Shuntur	150				150
37	Cía. Minera Santa Luisa S.A.	Huanzalá		5500			5500
38	Industria de Fortificación Minera S.A.	FORMIN		2908			2908
39	Representaciones Mineras y Comerciales S.A. -REMICSA	REMICSA		1484			1484
40	Cía. Minera Condestable S.A.	Raul		1030			1030
41	Hochschild Mining	Arcata				12500	12500
42		Pallancata					
43		Inmaculada					
44	Consorcio Minero Horizonte S.A.	Parcoy			21200		21200
45		Coripunco					
TOTAL DEMANDA MENSUAL DE PERNOS POR TIPO			205401	84893	29200	116850	436344

Fuente: Elaboración propia.

### 9.3 Análisis de los efectos ambientales cuando los pernos se instalan con equipo manual

Como se indicó anteriormente, no ha sido posible establecer cuantas minas y que cantidad de pernos son instalados en la práctica utilizando equipos manuales o mecanizados, por lo que se hace este análisis, suponiendo que todos los pernos se instalan con equipo manual en este caso, para lo cual, se puede usar cualquiera de las perforadoras Jackleg resaltadas en la tabla 80, se decidió hacer el análisis con la perforadora Jackleg Seco E39

3X, por ser la perforadora aplicada para la instalación de pernos de roca durante los ensayos en la mina Castrovirreyna, que ilustra la figura 226. El consumo de aire de esta perforadora es de 73 l/s (154 CFM) @ 90 PSI.

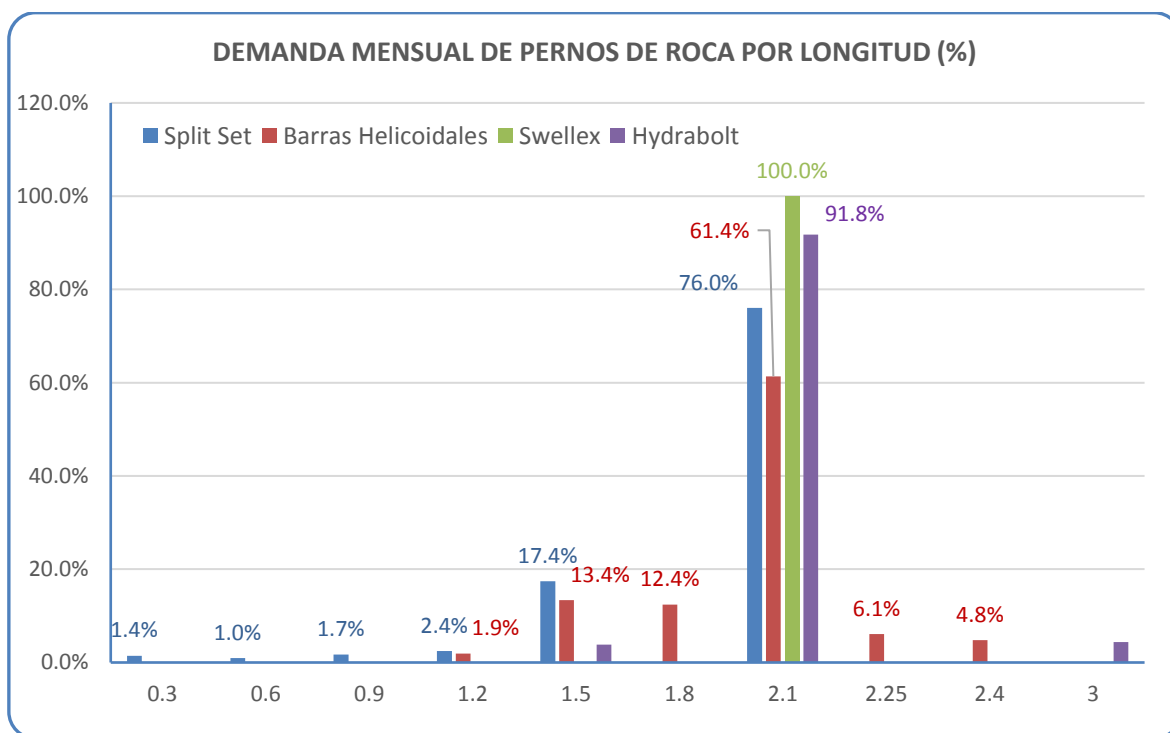


Figura 225. Demanda Porcentual de Pernos de Roca en la Minería Subterránea Peruana en Función de su Longitud  
Fuente: Elaboración propia.

Dado que las perforadoras jackleg para operar requieren de aire comprimido, generado por compresores portátiles o estacionarios. Los estacionarios pueden ser eléctricos o diésel, mientras que los portátiles son diésel. El compresor más pequeño compatible para el accionamiento de la perforadora Jackleg, podrían ser cualquiera de los que se presentan resaltados en la tabla 81; luego, seleccionando el compresor Atlas Copco (Epiroc) XAS 97 Dd de 187 CFM y potencia de motor de 48 HP y consumo de combustible de 2 gl/h, la figura 227 ilustra a este compresor, siendo su consumo unitario de combustible de 0,0416 gl/HP-h. Cabe destacar que, los compresores portátiles utilizados en las minas son de mucha mayor capacidad, dado que tienen que abastecer más una perforadora u otro equipo neumático.



Tabla80

*Especificaciones Técnicas de Distintas Marcas de Perforadoras Jackleg Aplicadas en la Minería Peruana*

Perforadoras Jackleg		Peso (kg)		Pistón		Frecuencia de impactos (golpes/min)	Rango de diámetros de perforación (mm)	Presión de trabajo (PSI)	Consumo de aire @ 90 PSI (l/s)
Marca	Modelo	Perforadora	Pie de avance	Diámetro (mm)	Carrera (mm)				
Atlas Copco	Sinker 260B	33 - 15				2250		90	80
	BBC16W	28,5		70,0	55,0	2340	27 - 41	90	69
	BBC34WS	34,5		80,0	70,0	2250	28 - 41	90	88
	BBC34WS	33,5		80,0	70,0	2280	29 - 41	90	88
	BBD40WS	27,3	21,8	90,5	44,0	3000		90	96
Seco	PLB-23CL	25,0	11,0	79,4	60,0	2500		90	62
	E39 3X	25,0	14,0	76,0	70,0	2300		90	73
Toyo	TY-280L	29,0	15,5	76,0	70,0	2000		90	46
Board Long Year	PHQ250	36,7	15,9	79,4	73,0	2250		90	82,6
	YT28	26,0		80,0	60,0	2220		58 - 92	
	YT27	27,0		80,0	60,0	2202		92	
	YT29	27,0		82,0	60,0	2400		60 - 92	
	YT24 C	24,0		66,7	60,0	1380		58 - 87	

Fuente: Elaboración propia.



Figura 226. Perforadora Seco E39 3X, durante la instalación de barras helicoidales en la Mina Castrovirreyna  
Fuente: Elaboración propia.

Con los resultados y las informaciones precedentes, se realizó el análisis cuyos resultados se presentan en la tabla 82, donde se analiza los diferentes rubros tanto para el diámetro actual y optimizado, con los que se determina por diferencia las correspondientes reducciones al optimizar los diámetros de taladros para la instalación de pernos de roca. Cabe destacar que, este análisis está basado en el consumo mensual de pernos de 2.1 m (7 pies) en la minería subterránea peruana, entre los rubros que se analizan están: Demanda mensual de pernos, metros de taladros perforados, horas de trabajo en la instalación de pernos, emisión de aceite al ambiente, consumo de aire comprimido, consumo de combustible, emisión de

dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), emisión de calor, consumo de agua, y requerimiento de ventilación.

Tabla81

*Compresores de Distintas Marcas Mostrando sus Principales Especificaciones Técnicas, Entre Ellas la Capacidad Volumétrica y Potencia de Motor*

MARCA	MODELO	Capacidad volumétrica		Presión de trabajo		Potencia del motor (HP)	Potencia unitaria (HP/m <sup>3</sup> -min)		Consumo de combustible (gl/h)
		m <sup>3</sup> /min	CFM	Bar	PSI		Por compresor	Promedio por marca	
Atlas Copco	XAS 97Dd	8,0	283	7,0	102	78,0	9,75		3
	XAS97Dd	5,3	187	7,0	102	48,0	9,06		2
	XAS 186Dd	11,1	392	7,0	102	111,0	10,00		5
	XRVS 466	27,0	953	7,0	102	540,0	20,00		24
	XAS 405	23,6	833	7,0	102	224,0	9,49		10
	XAS 495	28,8	1017	7,0	102	276,2	9,59	12,39	12
	XAS 175Dd	10,4	367	8,5	123	113,0	10,87		5
	XAMS 295	17,5	618	8,6	125	224,0	12,80		10
	DrillAir H32	32,5	1148	20,0	290	495,0	15,23		22
	XRHS 350	21,0	742	22,0	319	236,0	11,24		11
	XRHS 396	23,7	837	22,0	319	318,0	13,42		14
Sullair	DrillAir X28	28,7	1014	30	435	495	17,25		22
	400HH	11,3	399	9,0	131	157,0	13,89		7
	185 DPQ	5,2	185	7,0	102	49,0	9,37	11,11	2
	260 DPQ	7,4	260	7,0	102	74,0	10,05		3
Kaeser	M100	10,2	360	7,0	102	96,0	9,41		4
	M170	17,0	600	7,0	102	170,0	10,00	10,64	8
	M250	25,0	883	9,3	135	288,3	11,53		13
	M270	26,9	950	8,6	125	313,0	11,64		14
Ingersoll Rand	185 CFM	5,2	185	7,0	102	43,5	8,32		2
	375 CFM	10,6	375	7,0	102	116,7	11,00		5
	600 CFM	17,0	600	7,0	102	127,0	7,47	9,95	6
	750 CFM	21,2	750	8,6	125	195,8	9,22		9
	825 CFM	23,4	826	8,6	125	275,0	11,75		12
	1600 CFM	45,3	1600	7,0	102	540,0	11,92		24

Fuente: Elaboración propia.



Figura 227. Compresor Portátil Atlas Copco XAS 97 Dd

Fuente: recuperada de <https://www.machineseeker.com/mss/atlas+copco+xas+97+dd>.

Cabe precisar que, tanto en el sistema manual como en el mecanizado para la instalación de pernos de roca, no se está considerando en el análisis concerniente a emisión de calor por la penetración de la barra durante la perforación de taladros, calor emitido por el funcionamiento de ventiladores, la contaminación acústica producido por el funcionamiento de equipos, la contaminación por la transpiración del personal, contaminación ocasionado por lubricantes que utilizan los equipos (grasas), entre otros.

De los 11 rubros considerados en la tabla 82, a continuación se analizan los más importantes como son las emisiones al ambiente de aceites, dióxido de carbono y calor, los otros parámetros se presentan en la discusión analógica con el sistema mecanizado de instalación de pernos de roca en el acápite 9.5.

**9.3.1 Emisión de aceite al medio ambiente.** La emisión de aceite se produce siempre que funciona la perforadora neumática (jackleg), puesto que es parte del mecanismo de funcionamiento para lubricar las partes internas de la perforadora (pistón), en este caso el flujo de aire succiona el aceite de una lubricadora (chancha) instalada en la línea de aire por el principio de Venturi. Esta mezcla de aire con aceite es descargada al ambiente en forma de neblina como puede observarse en la figura 226.

La emisión de aceite por las perforadoras jackleg, se produce durante la perforación de los taladros y la penetración de los pernos dentro de los taladros perforados, como es el caso de los Split sets y las barras helicoidales, puesto que los pernos inflables como los Swellex y los Hydrabolt se introducen manualmente antes de proceder con su inflado. El consumo de aceite por las perforadoras jackleg es aproximadamente 0.002 87 l/min de funcionamiento, asimismo, el consumo por metro perforado de taladro también está en función del diámetro de taladro, luego proyectando el consumo de aceite para la demanda mensual pernos de roca de 2.1 m de longitud, se tiene que en total se emiten lo que ilustra la figura 228.

En la figura 228, se observa que en la actualidad se estaría emitiendo 8 076,7 litros (2 133,9 galones) de aceite por mes al ambiente, lo cual se reduciría a 6 924,4 litros (1 829,4 galones) al optimizar el diámetro de los taladros, es decir, 1 152,2 litros (304,4 galones o 5,534 cilindros de 55 galones) menos de aceite emitido por mes al ambiente.

Tabla82

*Análisis de Demandas y Efectos Ambientales en la Instalación de Pernos de Roca de 7 pies (2,10 m) con Equipo Manual por Mes en la Minería Subterránea Peruana*

PERNO	SPLIT SET		BHCC*		BHCR*		BHL C*		HYDRABOLT		SWELLEX		TOTALES POR MES	
LEA OPTIMA (pies)	4		3		3		3		3		3		Actual	Optimiz.
DIAMETRO (mm)	Actual 38	Optimiz. 37	Actual 36	Optimiz. 32	Actual 36	Optimiz. 32	Actual 36	Optim 32	Actual 38	Optimiz. 38	Actual 38	Optimiz. 41		
Demanda mensual de pernos de 2,1 m (pernos/mes)	156150	127952	34679	24544	15581	13313	Sólo en construcción civil		62500	62500	32200	30474	301110	258784
Reducción del número de pernos por optimización (NP1) (pernos/mes)	28198		10135		2267		0		0		1726		42326	
Metros perforados de taladros por mes (LT): LT = H x NP1 (mp/mes)	333247	273069	74011	52381	33251	28413					68720	65036	642354	552024
Reducción de metros perforados por mes (mp/mes)	60178		21630		4838						3684		90330	
Consumo de cartuchos para barras helicoidales (cartuchos/mes)			249229	123130	129423	78283							378652	201414
Reducción de número de cartuchos (cart/mes)			126099		51139								177238	
Horas de trabajo para instalar los pernos (h/mes)	27797	22777	4972	3519	2234	1909			9569	9569	4930	4666	49501	42439
Reducción de horas de trabajo (h/mes)	5020		1453		325				0		264		7062	
Emisión mensual de aceite al ambiente (l/mes)	4535	3716	811	574	364	311			1561	1561	804	761	8077	6924
Reducción de la emisión de aceite al ambiente (l/mes)	819		237		53				0		43		1152	
Consumo de aire comprimido por las perforadoras jackleg (m3/mes)	7611859	6237309	1361528	963618	611701	522694			2620307	2620307	1349982	1277615	13555376	11621541
Reducción del consumo de aire comprimido (m3/mes)	1374550		397910		89007				0		72367		1933835	
Consumo de combustible por el compresor XAS 97Dd (gl/mes)	53370	43732	9546	6756	4289	3665			18372	18372	9465	8958	95042	81483
Reducción de consumo de combustible (gl/mes)	9638		2790		624				0		507		13559	
Emisión de CO² al ambiente (kg/mes)	533494	437155	95426	67537	42872	36634			114112	114112	94616	89544	880520	744983
Reducción de la emisión de CO₂ al ambiente (kg/mes)	96338		27888		6238				0		5072		135537	
Cantidad de calor emitido por mes al ambiente (kcal/mes)	1814171745	1486568436	324499639	229663728	145789693	124576128			624510527	624510527	321747823	304500232	3230719427	2769819052
Reducción de la emisión de calor (kcal/mes)	327603309		94835910		21213565				0		17247591		460900375	
Consumo de agua (m³/mes)	4498	3686	972	688	437	373			1800	1800	903	854	8610	7402
Ahorro de consumo de agua (m³/mes)	812		284		64				0		48		1208	
Requerimiento de aire de ventilación por el personal (m3/mes)	10006826	8199792	1789914	1266807	804164	687152			3444750	3444750	1774735	1679599	17820389	15278100
Reducción de requerimiento de aire de ventilación (m3/mes)	1807034		523107		117012				0		95136		2542290	

\*BHCC = Barra helicoidal instalada con cartuchos de cementicio. BHCR = Barra helicoidal instalada con cartuchos de resina. BHLC = Barra helicoidal instalada con lechada de cemento

Fuente: Elaboración propia.

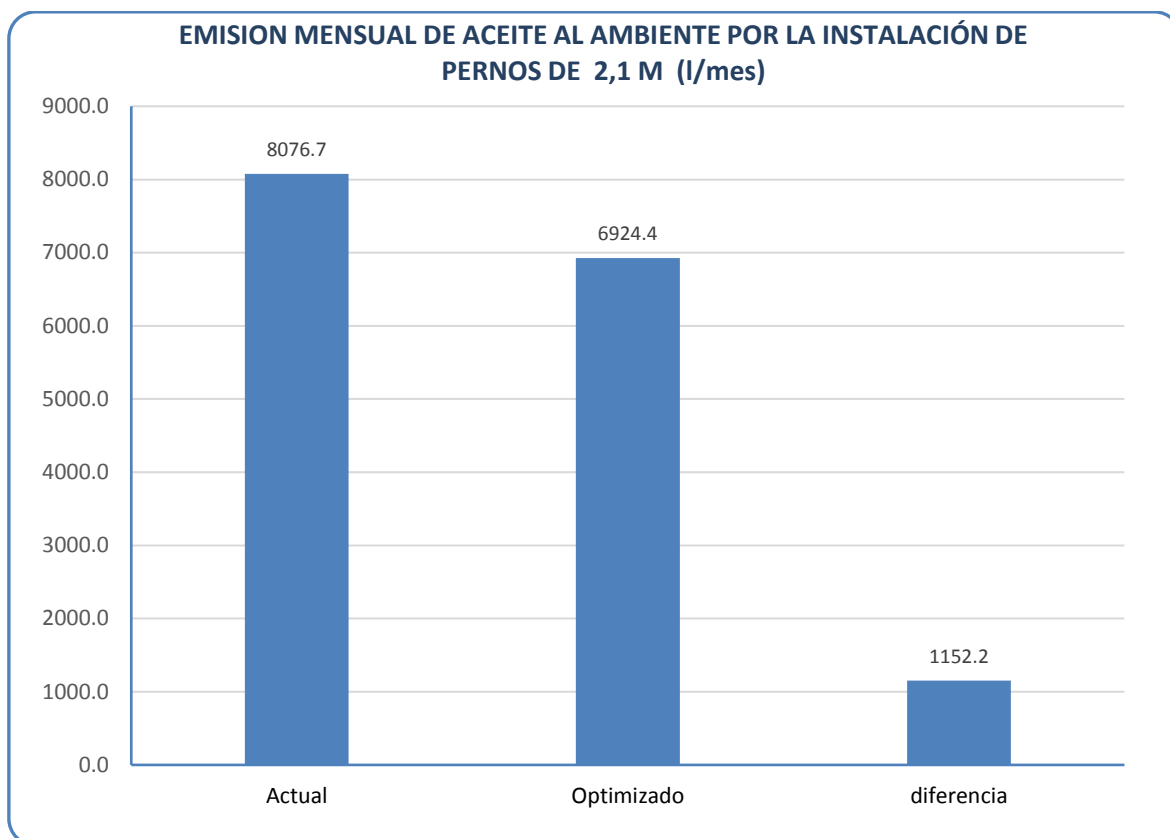
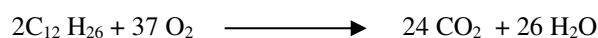
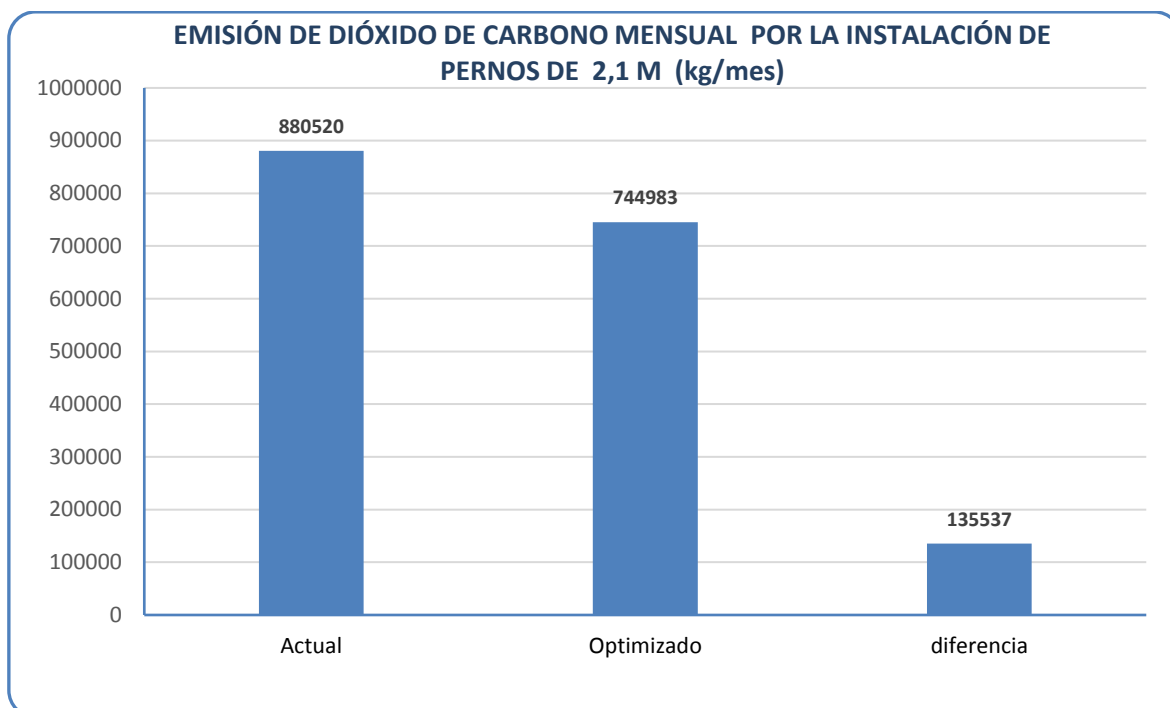


Figura 228. Emisión Mensual de Aceite al Ambiente Cuando los Pernos se Instalan con Equipo Manual  
Fuente: Elaboración propia.

**9.3.2 Emisión de dióxido de carbono.** El funcionamiento de todo equipo diésel, produce una serie agentes contaminantes como el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), gas de efecto invernadero que está causando mucho daño a nuestro planeta y la emisión de grandes cantidades de calor, considerando la combustión completa del petróleo, cuya ecuación química es la siguiente:



Se deduce que por cada litro de diésel se produce 2,641 kg de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y desprende 8 980,85 kcal de calor que va al ambiente (siendo la densidad de petróleo 0,85 g/cc). Con estos resultados y siendo la potencia del motor del compresor XAS 97Dd, 48 HP y consumo horario de diésel 2 gl/h, se determina previamente el consumo de diésel por perno instalado para cada caso, como puede observarse en la tabla 82, aplicando estos datos a cada tipo perno estudiado, se determinaron las respectivas emisiones de  $\text{CO}_2$ , cuyos totales ilustra la figura 229, donde se puede apreciar que por la instalación de pernos se estaría emitiendo actualmente 880 520 kg (880,5 t) de  $\text{CO}_2$ , mensualmente y al optimizar los diámetros de los taladros 744 983 kg (745 t), es decir, 135 537 kg (135,5 t) menos.

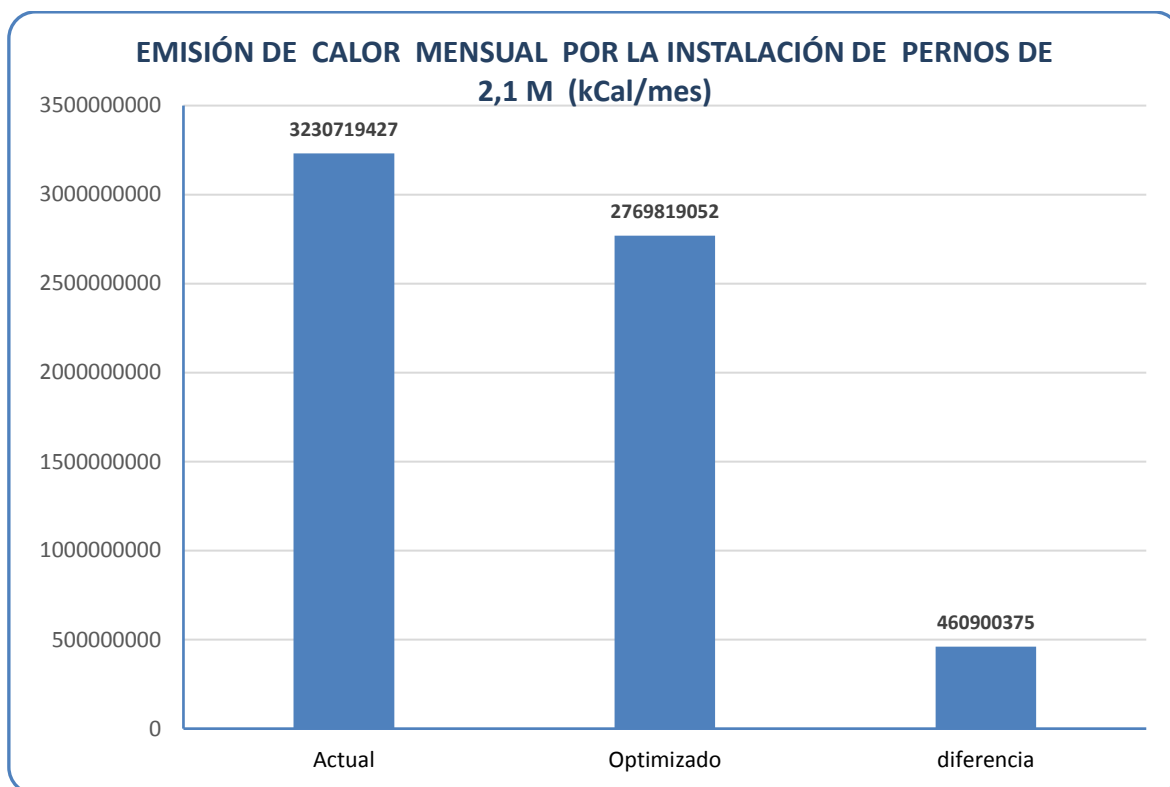


*Figura 229. Emisión Mensual de CO<sub>2</sub> al Ambiente Cuando los Pernos se Instalan con Equipo Manual*  
Fuente: Elaboración propia.

**9.3.3 Emisión de calor.** Como se ha indicado en el acápite anterior, la combustión de cada litro de diésel desprende 8 980,85 kcal de calor, aplicando este dato al consumo de combustible del compresor XAS 97Dd, se determina la cantidad de calor emitida por la instalación de los distintos tipos de pernos, cuyos totales ilustra la figura 230, donde puede apreciarse que la instalación manual de los pernos de roca propicia la emisión de 3 230 719 427 kcal (más de 3230 millones de kcal) mensual de calor, mientras que al optimizar el diámetro de taladros se emitiría 2 769 819 052 (más de 2 769 millones), significando una reducción de 460 900 375 kcal (cercano a los 461 millones) por mes. Cabe recalcar que no se ha tomado en cuenta la emisión de calor ocasionado por la penetración del varillaje y la transpiración del personal.

#### **9.4 Análisis de los Efectos Ambientales Favorables Cuando los Pernos se Instalan Con Equipo Mecanizado**

Para hacer este análisis, se consideró que todos los pernos de 2,1 m son instalados con la empernadora mecanizada Robolt DS311 de Sandvik, que ilustra la figura 231, cuyas características técnicas se presentan en la tabla 83. Cabe destacar que, este análisis también se pudo haber llevado a cabo con otros modelos o marcas de empernadoras.



*Figura 230.* Emisión Mensual de Calor al Ambiente Cuando los Pernos se Instalan con Equipo Manual  
Fuente: Elaboración propia.



*Figura 231.* Empernadora Sandvik Robot DS311

Fuente: recuperada de: <https://mining.dev.ibp.sandvik.com/en/products/equipment/underground-drilling-and-bolting/rock-support-drills/ds311>.

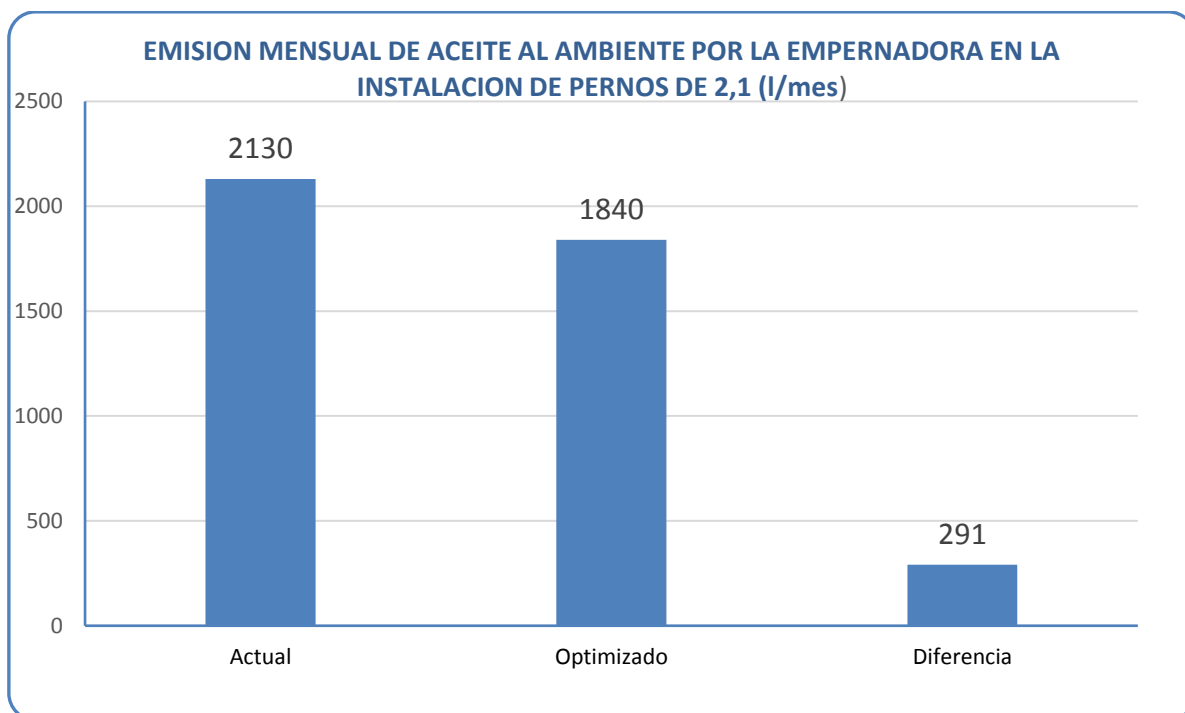
Siguiendo el procedimiento establecido en el caso precedente, se hizo el análisis cuyos resultados se presentan en la tabla 84, donde se analiza los diferentes parámetros tanto



para el diámetro actual y optimizado, con la perspectiva de determinar las reducciones de los consumos y emisiones que afectan al medio ambiente; al optimizar los diámetros de taladros donde se instalan los pernos de roca. Cabe reiterar que, al igual que en el caso anterior este análisis está basado en el consumo mensual de pernos de 2,1 m de longitud en la minería subterránea peruana, además de los parámetros analizados en el caso anterior, aquí se analizan otros como el consumo de aceite hidráulico; emisión de calor por el sistema diésel de la empernadora, el accionamiento eléctrico y la bomba hidráulica; y, requerimiento de ventilación por el accionamiento diésel de la empernadora.

Al igual que en el caso anterior, de todos los rubros analizado y presentados en la tabla 84, seguidamente se detallan referente las emisiones al ambiente de aceites, dióxido de carbono y calor, los otros parámetros se presentan en la discusión final presentado en el acápite 9.5, conjuntamente con lo concerniente al sistema manual de instalación de pernos de roca.

**9.4.1 Emisión de aceite al medio ambiente.** La emisión de aceite en este caso, se produce en la lubricación del adaptador de culatas (shank adapter), que es inyectado en el flujo del aire comprimido y es descargada al ambiente. La emisión de aceite en este caso, se produce durante la perforación de taladros y está en función del diámetro y profundidad de los taladros, siendo en el presente análisis la profundidad de taladros 2,1 m, de determina que por cada perno instalado se emite 0,0066; 0,0074 y 0,0077 litros de aceite para los pernos Split Set, barras helicoidales y Swellex, respectivamente. Por consiguiente, la emisión mensual de aceite al ambiente en la instalación de pernos de roca de 2.1 m de longitud, se grafica en la figura 232, donde se demuestra que la empernadora Robolt DS311 estaría emitiendo actualmente 2 130 litros (562,7 galones) de aceite al ambiente por mes y al aplicar diámetros optimizados se emitiría 1 840 litros (486,1 galones) con una diferencia de 291 litros (76,9 galones).



*Figura 232.* Emisión Mensual de Aceite al Ambiente por la Empernadora Robolt DS311 en la Instalación de Pernos de Roca de 2.1 m

Fuente: Elaboración propia.

Tabla83

Características Técnicas de Empernadoras de Roca Marca Epiroc (Atlas Copco) y Sandvik

Empernador		Tipos de pernos que instala / rango de longitudes (m)	Sistema Eléctrico		Cable eléctrico		SISTEMA HIDRAULICO			SISTEMA DE AGUA		SISTEMA DE AIRE		MARTILLO									CARRUAJE					
MARCA	MODELO		Potencia instalada (kW)	Tensión (V)	Diámetro del carrete (m)	Diámetro de cable (mm) / longitud (m)	Capacidad del tanque de aceite hidráulico mineral (l)	Filtración ( µm)	Presión (bar)	Presión del agua de burrido (bar) (mínima 2 bar)	Capacidad de la bomba de agua máxima (l/min)	Capacidad del compresor (l/min)	Presión (bar)	Modelo	Rango de diámetros que perfora (mm)	Potencia de percusión (kW)	Presión de persusión (bar)	Frecuencia de impactos (Hz)	Velocidad de rotación (RPM)	Consumo de aceite para lubricación del shank adapter (l/min)	Consumo de aire para la lubricación de shank adapter (l/min)	Consumo de agua (l/s)	Motor (Diésel)	Potencia (kW)	Capacidad del tanque de combustible (l)	Velocidad máxima horizontal (KPH)	Velocidad en gradiente (G = 14 %) (KPH)	
EPIROC (Atlas Copco)	Boltec 235	SS, Sw, BH CMC /L= 1,5- 2,40 m	66,0	380 - 1000	1,40		160		130 - 230	7	80			COP 1132 (75 kg)		11	200	100	0 - 300			360	1,25	Deutz	58			
	Boltec S (W=13700 kg)	SS, Sw, BH y C. CMC / L= ,5-2,40 m	80,0	380 - 1000		37/110, 32/150, 28/200	145	16		7	66	1200	7	COP RR11									55		60	15		
	Boltec M (21600 kg)	SS, Sw, BH Y C. CMC /L= 1,5-3,5 m	63,0	380 - 1000		56/90, 52/100, 42/150, 32/200		20		7	80			COP 1132 (75 kg)		11	200	100	0 - 300		360	1,25	120					
	Boltec SL (12800 kg)	SS, Sw, BH Y C. CMC /	63,0			33/85, 38/80, 34/85	140	20	150 - 230	7,5	75	700	7	COP 1132 (75 kg)		11	200	100	0 - 300		360	1,25			60			
SANDVIK	Robolt DS311 (15000 kg)	SS, Sw, BH. CMC/ 1,5 - 3 m	70,0				180	20	200	15	33	700	7	H200 (TS2-234) (W=95 kg)	33 - 41	10	200	40 - 65	300	0,002	360		Deutz	93	80	12	5	
	Robolt DS 511 (W=25000 kg)	SS, Sw, BH. CMC/1,5 - 6 m	90,0				200	20			65			RD 314 (122 kg)		14	160	110		0,003	250			110		16	5	
	Robolt DS 411 (W=23000 kg)	SS, Sw, BH. CMC/1,5 - 3 m	70,0	380 - 690			200	20		10 a 15	50	1000	7	RD314 (122 kg)	33 - 43	14	160	110	0 - 520	0,002 - 0,004	150 - 250			110	140	16	5	
	DS2710 (W=11500 kg)	SS, Sw, BH. CMC/1,5 - 2,4 m	70,0	380 - 690				10		15	33			H200 (TS2-234) (W= 95 kg)	33 - 41	10	200	40 - 65	300	0,002	250			74	60	8	4	
		DS422i Cable Bolter (W=29000 kg)	Capacidad para 19 piezas, φ 1 1/4"	200,0	380 - 1000			270	20		10 a 15	100	1000	7	RD414 (TS2-178) (w=180 kg)	51 - 57	14	220	78	300	0,003 - 0,007	250 - 350		Mo	119	100		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla84

*Análisis de Demanda y Efectos Ambientales en la Instalación de Pernos de roca de 7 pies (2,10 m) con Equipo Mecanizado por mes en la Minería Peruana*

PERNO	SPLIT SET		BHCC		BHCR		BHLC		HYDRABOLT		SWELLEX		TOTALES POR MES	
LEA OPTIMA (pies)	4		3		3		3		3		3		Actual	Optimiz.
DIAMETRO (mm)	Actual	Optimiz.	Actual	Optimiz.	Actual	Optimiz.	Actual	Optimiz.	Actual	Optimiz.	Actual	Optimiz.		
38	37		36	32	36	32	36	32	38	38	38	41		
Demanda mensual de pernos (pernos/mes)	156150	127952	34679	24544	15581	13313	0		62500	62500	32200	30474	301110	258784
Reducción del número de pernos (NP1) (pernos/mes)	28198		10135		2267		0		0		1726		42326	
Metros perforados de taladro (LT): LT = H x NP1 (mp/mes)	333247	273069	74011	52381	33251	28413			133384	133384	68720	65036	642613	552283
Reducción de metros perforados (mp/mes)	60177,8		21629,9		4838,3		0		0		3683,8		90329,8	
Consumo de cartuchos para barras helicoidales (cart./mes)			249229	123130	129423	78283							378652	201414
Reducción de número (cart./mes)			126099		51139								177238	
Horas de trabajo para instalar los pernos (h/mes)	5703,81	4673,82	1425,71	1009,04	640,54	547,33			2687,50	2687,50	1381,92	1307,84	11839,47	10225,53
Reducción de horas de trabajo (h/mes)	1030,00		416,67		93,20		0,00		0,00		74,08		1613,94	
Emisión de aceite al ambiente (l/mes)	1026,7	841,3	256,6	181,6	115,3	98,5			482,8	482,8	248,7	235,4	2130,2	1839,7
Reducción de la emisión de aceite al ambiente (l/mes)	185,4		75,0		16,8		0,0		0,0		13,3		290,5	
Consumo mensual de aire comprimido (m3/mes)	85557	70107	13775	9749	6189	5288			25729	25729	13256	12545	144506	123419
Reducción del consumo de aire comprimido (m3/mes)	15450		4026		901		0		0		711		21087	
Consumo de combustible (gl/mes)	1789,6	1466,4	447,3	316,6	201,0	171,7			843,3	843,3	433,6	410,3	3714,8	3208,4
Reducción de consumo de combustible (gl/mes)	323,2		130,7		29,2		0,0		0,0		23,2		506,4	
Emisión e CO2 al ambiente (kg/mes)	17889	14659	4471	3165	2009	1717			8430	8430	4334	4102	37134	32072
Reducción de la emisión de CO2 (kg/mes)	3230		1307		292		0		0		232		5062	
Cantidad de calor emitido (kCal/mes)	60832029	49846975	15205400	10761580	6831412	5837387			28667165	28667165	14738352	13948289	126274357	109061395
Reducción de la emisión de Calor (kCal/mes)	10985054		4443820		994025		0		0		790063		17212962	
Consumo mensual de agua (m3/mes)	19031	15594	2861	2025	1285	1098			7637	7637	3934	3724	34748	30078
Ahorro de agua (m3/mes)	3437		836		187		0		0		211		4671	
Requerimiento de aire de ventilación (m3/mes)	2053373	1682574	513255	363255	230593	197040			967500	967500	497490	470822	4262211	3681191
Reducción del requerimiento de aire de ventilación (m3/mes)	370798		150000		33553		0		0		26668		581020	
Consumo de aceite hidráulica (l/mes)	513,3	420,6	128,3	90,8	57,6	49,3			241,9	241,9	124,4	117,7	1065,6	920,3
Reducción del consumo de aceite hidráulico (l/mes)	92,7		37,5		8,4		0,0		0,0		6,7		145,3	
Emisión de calor accionamiento eléctrico (kCal/mes)	30925197	25340722	7729974	5470868	3472887	2967554			14571213	14571213	7492540	7090896	64191812	55441253
Reducción de la emisión de calor - sistema eléctrico (Kcal/mes)	5584475		2259106		505333		0		0		401645		8750559	
Calor emitido por la bomba hidráulica (kCal/mes)	184792055	151422288	46190094	32690912	20752071	17732479			87069596	87069596	44771321	42371313	383575137	331286587
Reducción del calor emitido por la bomba hidráulica (kcal/mes)	33369767		13499182		3019592		0		0		2400008		52288549	
Requerimiento de aire de ventilación (m3/mes)	12833578	10516089	3207845	2270343	1441206	1231499			6046875	6046875	3109313	2942635	26638816	23007441
Reducción de la demanda de aire (m3/mes)	2317489		937501		209707		0		0		166678		3631375	

\*BHCC = Barra helicoidal instalada con cartuchos de cementicio. BHCR = Barra helicoidal instalada con cartuchos de resina. BHLC = Barra helicoidal instalada con lechada de cemento

Fuente: Elaboración propia.

**9.4.2 Emisión de dióxido de carbono.** Los equipos mecanizados de perforación y empernado, son diésel-eléctrico-hidráulicos, el sistema diésel emplean únicamente para su desplazamiento de un lugar a otro, por lo que consume diésel únicamente por el tiempo que dura su traslado, de acuerdo a experiencias este tiempo es aproximadamente el 10 % del tiempo nominal de un turno. Al no tener disponible la información sobre consumo unitario de combustible por la empernadora Robolt DS311, como puede observarse en la tabla 85, por analogía se puede considerar similar al de un camión de bajo perfil, cuyo promedio correspondiente al de 13 camiones analizados es, 0.0251 gl/HP-h, como puede corroborarse en la tabla 85 y siendo la potencia de la empernadora de 125 HP (93 kW) (ver tabla 83), se determina el consumo horario de combustible.

Asimismo, cuando se hizo análisis similar para la instalación manual se dedujo que, por cada litro de diésel produce 2,641 kg de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y desprende 8 980,85 kcal de calor que se emite al ambiente. Con estos resultados, se determinó previamente la emisión de  $\text{CO}_2$  por perno instalado para luego proyectar al consumo mensual de pernos de roca de 2,1 m aplicados en la minería nacional, cuyos resultados ilustra la figura 233, apreciándose en ella que, la instalación de los pernos con este tipo empernadoras desprende 37 134 kg de  $\text{CO}_2$  por mes y al optimizar los diámetros de los taladros 32 072 Kg, es decir, 5 062 Kg menos.

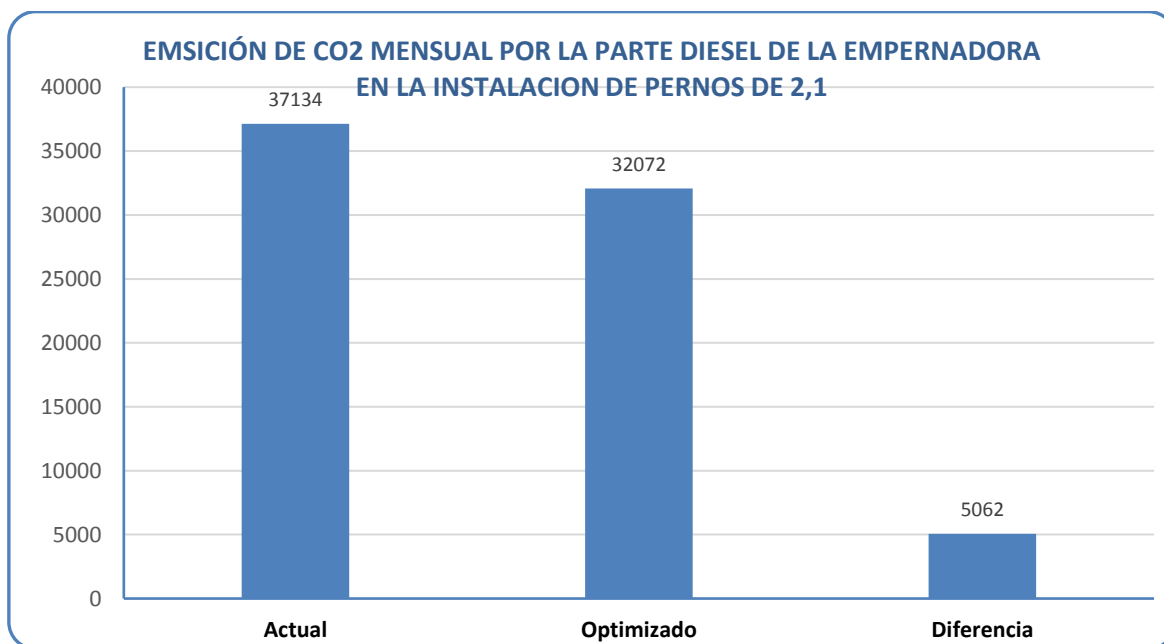


Figura 233. Emisión Mensual de Dióxido de Carbono por la Empernadora Robolt DS311  
Fuente: Elaboración propia.

Tabla85

*Análisis de Consumo Unitario de Combustible paara Algunos Equipos de Aplicación Subterránea en Función de su Potencia (gj/HP-h)*

EQUIPO	MARCA	POTENCIA (HP)	Capacidad de carga (kg)	CONSUMO (l/h)	Consumo unitario por potencia		Consumo promedio (gl/HP-h)	Potencia unitaria por tonelada movida (HP/t)		Generación de dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )		Emisión de calor por el funcionamiento de equipo	
					l/HP-h	gl/HP-h		Parcial	Promedio	kg/HP-h	kg/t-h	Kcal/HP-h	Kcal/t-h
Scooptrams	R1300G	182	6800	22,00	0,1209	0,0319		26,7647					
	R1600G	270	10200	33,00	0,1222	0,0323		26,4706					
	R1700G	310	14000	42,00	0,1355	0,0358		22,1429					
	R2900G	430	17200	50,00	0,1163	0,0307		25,0000					
	R2900G XTRA	447	20000	53,00	0,1186	0,0313		22,3500					
	ST700	180	6500					27,6923					
	ST-2G	117	3600					32,5000					
	ST1030	250	10000					25,0000					
	CT1200	277	12800					21,6406					
	CT2500A	85	2740				0,0354	31,0219	26,1929	0,3540	9,2715	1203,6	31525,4
	CT6000	185	6800					27,2059					
	CT7000	255	7200					35,4167					
	CT10000	277	10750					25,7674					
	CT1500	280	15000					18,6667					
	CT8000	231	8000					28,8750					
	L110	220	9000					24,4444					
Camiones de bajo perfil	ECJ 100D	116	4540	18,90	0,1629	0,0430		25,5507					
	ECJ60	68	2724	11,00	0,1618	0,0427		24,9633					
	AD30	408	30000	39,00	0,0956	0,0253		13,6000					
	AD40	489	40000					12,2250					
	AD45B	587	45000	55,00	0,0937	0,0248		13,0444					
	AD55	650	55000	62,00	0,0954	0,0252		11,8182					
	EJC415	185	15000					12,3333					
	EJC-417	210	15420	20,00	0,0952	0,0252		13,6187					
	ECJ-430	300	30000	29,00	0,0967	0,0255	0,0251	10,0000	12,6653	0,2509	3,1774	853,0	10803,9
	MT65	760	65000	72,00	0,0947	0,0250		11,6923					
	MT436LP	400	32600	38,00	0,0950	0,0251		12,2699					
	MT5020	700	50000	66,00	0,0943	0,0249		14,0000					
	MT2010	300	20000	28,00	0,0933	0,0247		15,0000					
	MT6020	760	60000	72,00	0,0947	0,0250		12,6667					
	MT42	520	42000	50,00	0,0962	0,0254		12,3810					

Fuente: Elaboración propia.

**9.4.3 Emisión de calor.** Las fuentes de calor analizadas por el funcionamiento de la empernadora Robolt DS311 son: el calor generado durante su desplazamiento con el sistema diésel, el accionamiento eléctrico y la bomba hidráulica. Para cuantificar el calor generado por la parte diésel del equipo, se ha seguido el mismo procedimiento que lo correspondiente para la instalación manual (compresor XAS 97Dd), considerando que la combustión de cada litro de diésel emite 8 981 kcal y teniendo ya calculado el consumo de combustible por perno instalado, se determina el consumo mensual.

Para determinar el calentamiento generado por el funcionamiento del motor eléctrico de 70 kW (ver tabla 83), se ha recurrido a la tabla 86 para determinar la eficiencia del motor eléctrico, por consiguiente, siendo la potencia de del motor eléctrico 70 kW la eficiencia 91 %, siendo así, el 9% de potencia (6,3 kW) se transforma en calor, es decir a razón 5 421, 847 kcal/h. Con estos resultados y el tiempo para instalar cada tipo de perno se determinó la cantidad de calor emitido por perno y consecuentemente lo emitido por mes para la demanda mensual de pernos, cuyo resultado se presenta en la figura 234.

Tabla86  
*Eficiencia de los Motores Eléctricos en Función de su Potencia*

POTENCIA (HP / kW)	Eficiencia (%)
5 - 50 / 3,73 - 37,3	83 - 95
50 - 100 / 37,3 - 74,57	90,5 - 91,5
100 - 200 / 74,6 - 149,1	91,5 - 93

Fuente: Elaboración propia.

Para calcular el calor emitido por la bomba hidráulica, se ha usado la fórmula  $C = 0,367 \cdot 41QP$ , donde: C = calor emitido por la bomba hidráulica en kcal/h, Q = Caudal del aceite hidráulico en gal/min (gpm) y P = Presión del aceite hidráulico en PSI, con los valores correspondientes presentados en la tabla 84, se calcula el flujo de calor por hora, luego considerando el tiempo de instalación de cada perno se determina la emisión de calor por perno instalado y finalmente la emisión mensual de calor.

Cabe resaltar que, no se está considerando el calor generado por los Switchs, enchufes, válvulas, y otros accesorios, por ser de menos cuantía. La sumatoria de las emisiones de calor de las tres fuentes, se presenta en la figura 234, donde se verifica que al instalar los pernos de roca con las empernadoras Robolt DS311, se emite al ambiente actualmente 574 041 305 kcal/mes (más de 574 millones), optimizando el diámetro de los taladros se emitiría 495 789



236 kcal/mes (más de 495,7 millones de kcal), con una diferencia de 78 252 069 kcal/mes (más de 78 millones). Al igual que en el caso de la instalación manual, no se ha tomado en cuenta la emisión de calor por la penetración del varillaje y la transpiración del personal.

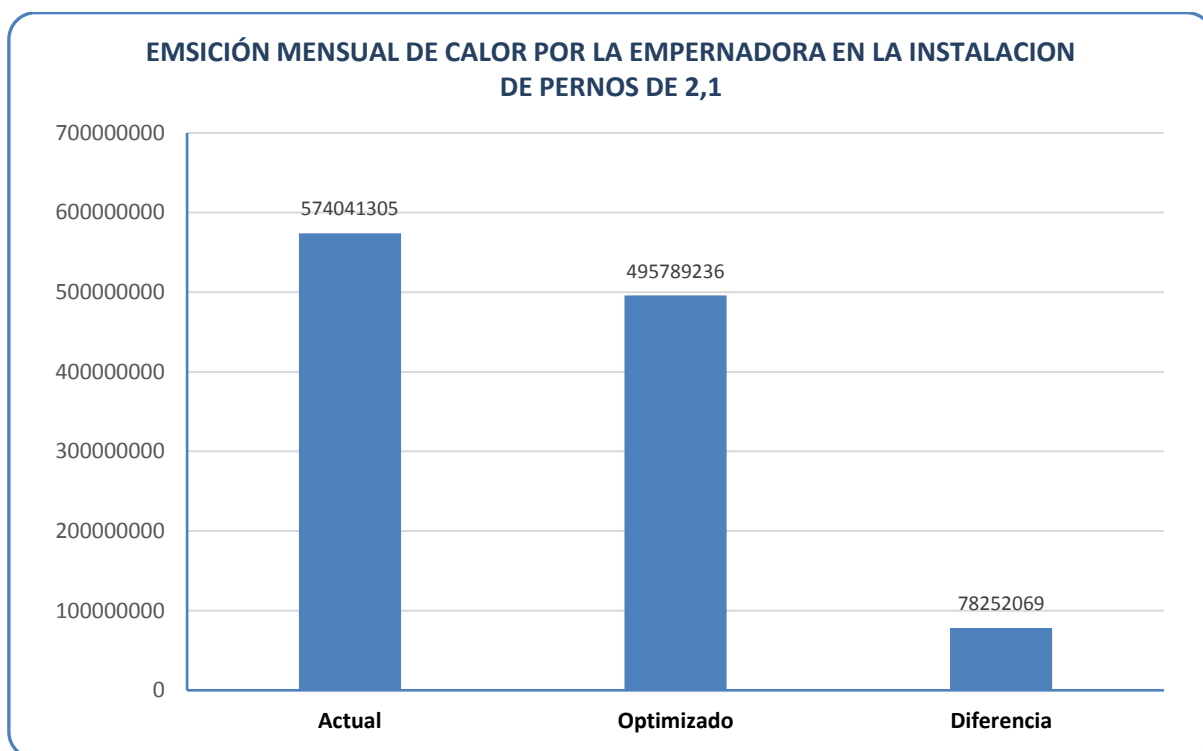


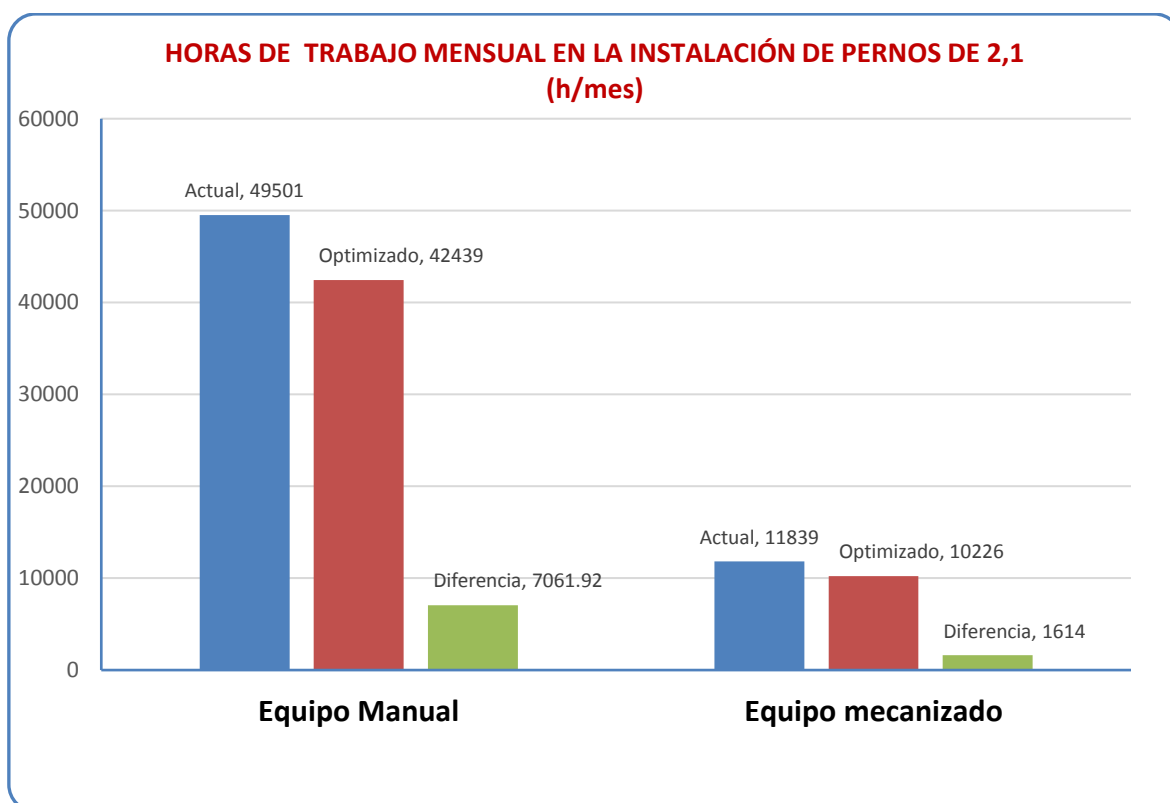
Figura 234. Emisión de Calor por el Funcionamiento del Motor Eléctrico de la Empernadora Robolt DS311  
Fuente: Elaboración propia.

## 9.5 Discusión de los Efectos Ambientales de la Optimización del Diámetro de Taladros Aplicando Equipo Manual y Mecanizado

**9.5.1 Horas laboradas por mes en la instalación de pernos.** La ocurrencia de toda actividad o evento depende del tiempo, de allí su importancia, más aún cuando ocurren escenarios desfavorables, es este caso contra el medio ambiente. Es decir, cuanto más prolongado sea el tiempo en que ocurren las emisiones (sólidas, líquidas y gaseosas), o consumos tomados de la naturaleza como el aire y el agua, tanto mayor serán los daños al ambiente.

Para determinar el ahorro de tiempo en la instalación de pernos de roca, como consecuencia de la optimización de los diámetros de los taladros, se hizo estudios de tiempos tanto con el sistema manual como mecanizado, a fin de determinar los promedios de dichos tiempos para los diferentes tipos de pernos, que se presentan en las tablas 82 y 84; con cuyos resultados se aplicaron a la demanda mensual de pernos de roca para determinar el tiempo tanto para los diámetros actuales como para los optimizados, que se presentan en la figura 235, donde

se puede observar que las horas actuales de instalación con el sistema manual y mecanizado son respectivamente, 49 501 y 11 839 horas por mes, se concluye que la instalación con el sistema mecanizado demanda únicamente el 24 % del tiempo que se emplea con el sistema manual, por la velocidad de instalación. Al optimizar los diámetros de taladros, con el sistema manual el tiempo se reduciría a 42 439 horas por mes, es decir, 7 061,92 horas menos (14,2 %); con el sistema mecanizado, las horas mensuales descenderían a 10 226, es decir 1 614 horas menos (16,6 %). Si se compara las horas correspondientes a las optimizaciones de diámetros, se observa que mantiene una diferencia muy grande entre ambas cantidades de horas (32 213 horas), porcentualmente se mantiene en 24 % del tiempo optimizado con equipo manual.



*Figura 235.* Horas Mensuales de Trabajo en la Instalación de Pernos de roca  
Fuente: Elaboración propia.

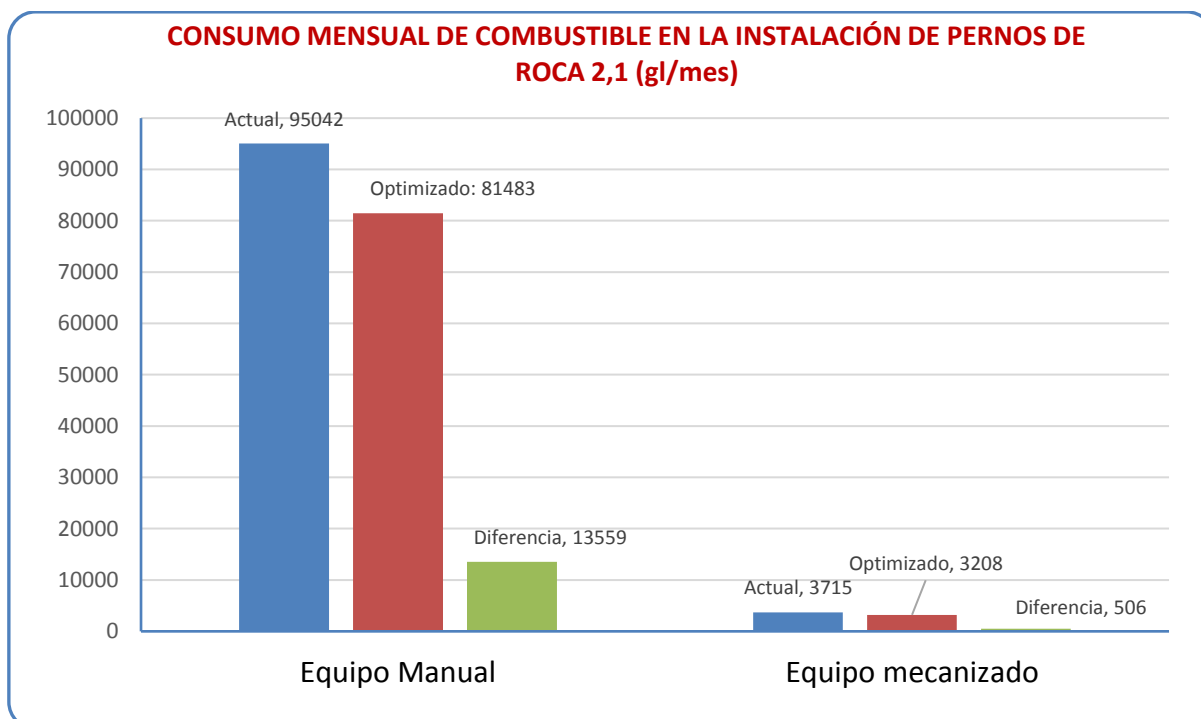
**9.5.2 Consumo mensual de combustible en la instalación de pernos.** Una de las principales causas de la contaminación ambiental es el empleo de combustibles fósiles (petróleo o carbón), que provocan la emisión de grandes cantidades de contaminantes a la atmósfera. Los combustibles fósiles se utilizan para generar energía térmica y eléctrica y, están presentes en la vida cotidiana del hombre. Los hidrocarburos presentes en los combustibles fósiles, liberan gases de efecto invernadero, causantes del cambio climático, como el metano, CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, etc.

que contaminan y dañan la capa de ozono. Otros gases dañinos como CO y SO<sub>2</sub>, que emanan los combustibles fósiles, causan lluvias ácidas muy dañinas para la ecología (Airgo2, 2018).

El uso industrial de los combustibles fósiles, generan contaminantes químicos y físicos perjudiciales para la salud, casi el 80 % de las emisiones de CO<sub>2</sub>, provienen del consumo y transformación de los combustibles fósiles en energía. Las comunidades más vulnerables ante la contaminación ocasionada por los combustibles fósiles, son los ancianos, mujeres en gestación y niños. Siendo estos últimos los más afectados, dado que respiran más, beben más agua y sobre todo por su metabolismo inmaduro. Algunas de las enfermedades derivadas por el uso de combustibles fósiles son: conjuntivitis, faringitis, cefaleas, bronquitis asmática, insuficiencia cardíaca y enfermedades pulmonares (Inspiration, 2019).

El consumo de combustible tiene una serie de implicancias para el medio ambiente, dado al convertirse en energía se transforma en gases nocivos y calor principalmente, es decir, a mayor consumo de combustible, mayor contaminación. El consumo de combustible en caso de la instalación de pernos con equipo manual, es debido al funcionamiento del compresor de aire, considerado el mínimo compatible para el accionamiento de la perforadora jackleg (compresor portátil XAS 97Dd), y en el caso de la instalación con equipo mecanizado, corresponde a la parte diésel de la empernadora Robolt DS311. Como puede apreciarse en la figura 236, el consumo de combustible con equipo mecanizado es ínfimo comparado con lo de la instalación manual, así, actualmente con la instalación con equipo manual se consume 95 042 gl/mes, mientras que con el equipo mecanizado 3 715 gl/mes, lo cual significa el 4 % de lo que se consume con el equipo manual.

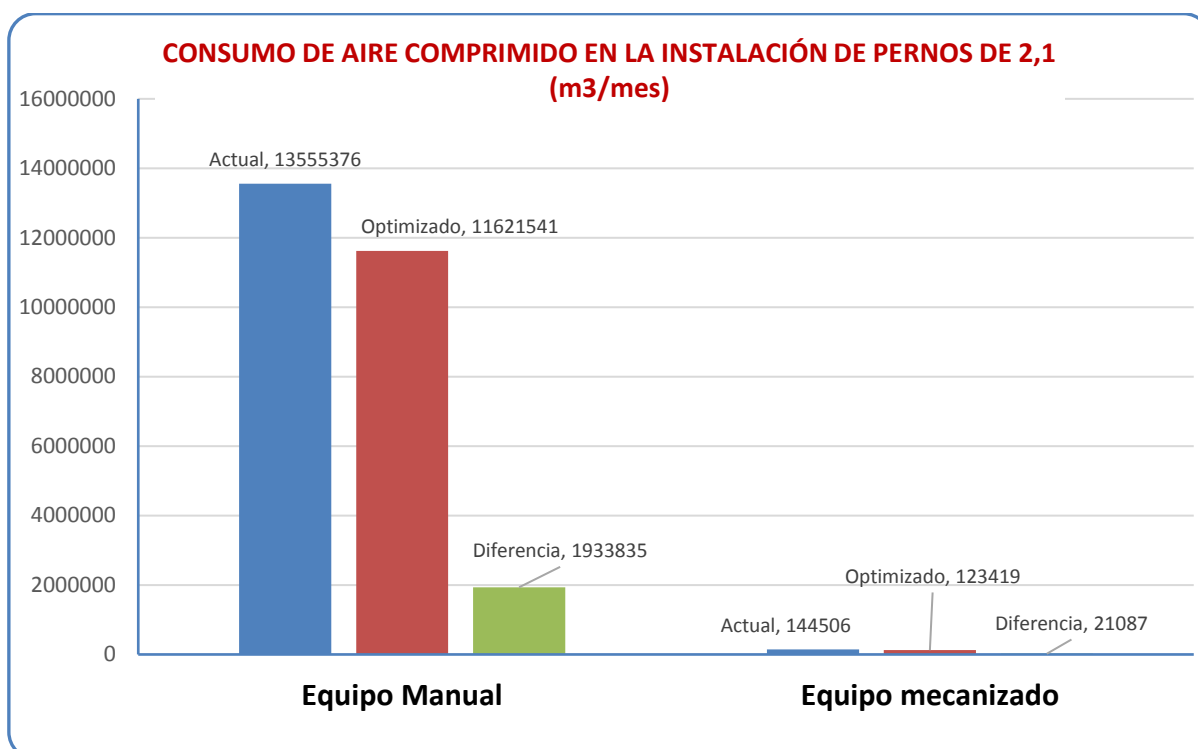
Al instalar los pernos en diámetros óptimos, el consumo de combustible se reduce, en caso de la instalación con equipo manual, desciende a 81 483 gl/mes que viene a ser el 85,7 % del consumo actual. En caso del equipo mecanizado descendería de 3 715 a 3 208 gl/mes, es decir se reduce a 86,4 %. Por consiguiente, al optimizar los diámetros de los taladros, el consumo de combustible se reduce, en caso de los equipos manuales en 14,3 % y 13,6 % con equipos mecanizados.



*Figura 236.* Consumo Mensual de Combustible para la Instalación de Pernos de Roca con Equipo Manual y Mecanizado

Fuente: Elaboración propia.

**9.5.3 Consumo de aire comprimido en la instalación de pernos de roca.** El aire comprimido es el aire atmosférico atrapado por un equipo de compresión a altas presiones, útil para accionar equipos neumáticos u otros usos. El aire comprimido puede contener impurezas como agua, polvo, óxido y aceite procedente de la lubricación del Compresor (caso de compresores de tornillo húmedo). Para cuantificar el consumo de aire comprimido mensual, primero se determinó el consumo por cada perno instalado, en caso de la instalación manual generado por el compresor XAS 97 Dd, considerando el compresor más pequeño compatible para accionar una perforadora jackleg. Asimismo, en caso de la empernadora Robolt DS31, el aire comprimido es utilizado para lubricar su adaptador. Los valores unitarios por perno, se proyectó para el consumo mensual de pernos de roca, obteniéndose los resultados comparativos que ilustra la figura 237, donde se aprecia que la instalación de pernos con equipo manual, actualmente estaría consumiendo 13 555 376 m<sup>3</sup> de aire y al optimizar los diámetros de los taladros consumiría 11 621 541 m<sup>3</sup>, es decir, 1 933 835 m<sup>3</sup> (14,3 %) menos. Para el caso de las empernadoras, el consumo actual estaría en 144 506 m<sup>3</sup> y al optimizar el diámetro de los taladros 123 419 m<sup>3</sup>, es decir, 218 087 m<sup>3</sup> (15 %) menos. La diferencia de aire comprimido entre ambos sistemas es más que evidente, puesto que, el sistema manual emplea aire comprimido para todo el proceso de instalación accionando a las perforadoras jackleg (perforación de taladros, instalación y lubricación), mientras que, en las empernadoras, el aire comprimido es usado únicamente para lubricar el adaptador de la perforadora.



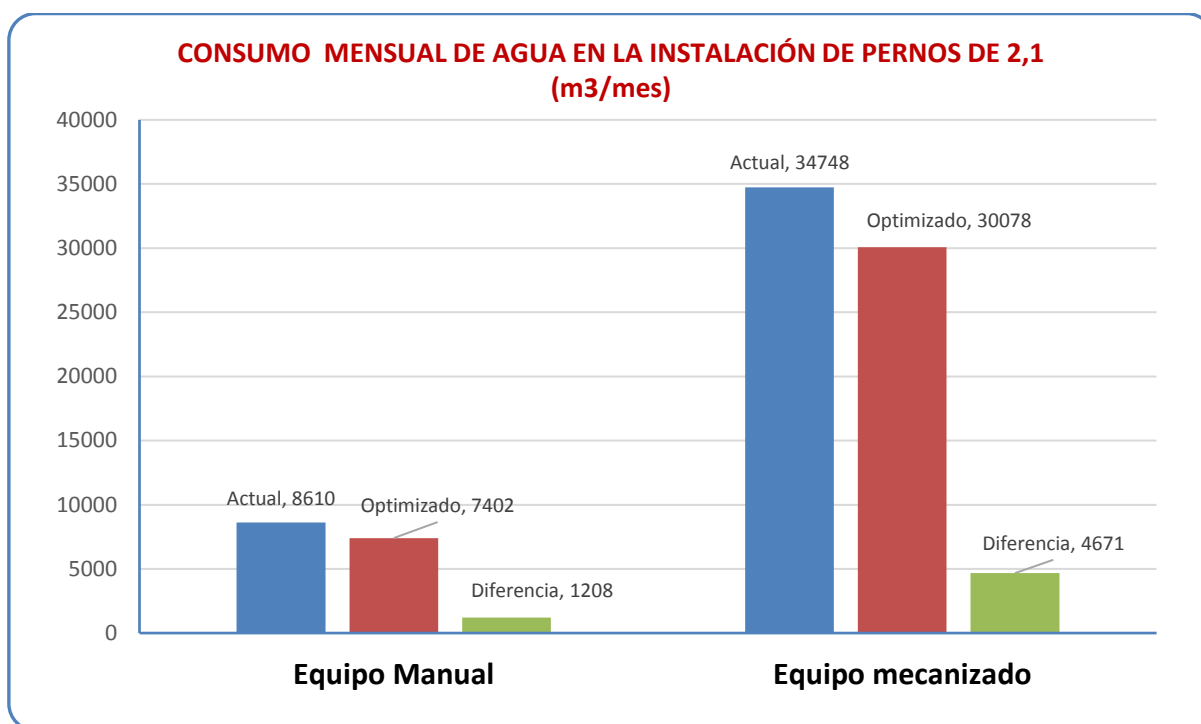
*Figura 237.* Consumo Mensual de Aire Comprimido Para la Instalación de Pernos de Roca con Equipo Manual y mecanizado

Fuente: Elaboración propia.

**9.5.4 Consumo mensual de agua en la instalación de pernos de roca de 2,10 m (7 pies).** El agotamiento del agua es uno de los problemas más álgidos de la humanidad, que preocupa a los científicos, políticos y la población en general, dado que el hombre consume únicamente agua dulce superficial o subterránea, luego de un tratamiento para no dañar la salud. Las causas actuales del agotamiento del agua es la contaminación (aguas residuales, pesticidas agrícolas, minería, desechos industriales), el cambio climático, falta de racionamiento del agua. El agua utilizada en la perforación de taladros de cualquier tipo, se contamina con los minerales (plomo, zinc, hierro, cobre, micas, asbesto, etc.) que contiene la roca en perforación, que es emanado a través de canales y cuneta a una cuenca.

Según las especificaciones de las perforadoras manuales jackleg, éstas consumen alrededor de 3,78 litros por minuto durante la perforación de taladros, mientras que la empernadoras 75 l/min. Teniendo como datos los tiempos de perforación de cada taladro, se determinó el consumo de agua para cada caso. Cabe precisar que, el consumo de agua se produce únicamente cuando los equipos perforan los taladros, no así cuando propiamente hacen la instalación. Estos cálculos combinados con el consumo mensual de pernos de roca, permitió determinar el consumo de agua mensual que ilustra la figura 238, deducidas de las tablas 82 y 84. En esta última Figura, se aprecia que el consumo de agua de las empernadoras es muy

superior al del sistema manual, 34 748 m<sup>3</sup> por mes y con la optimización de los diámetros de los taladros descendería a 30 078 m<sup>3</sup>, con una reducción de 4 671 m<sup>3</sup> (13,4 %). La instalación manual consume actualmente, 8 610 m<sup>3</sup> (24,8 % de lo que consume el sistema mecanizado), al optimizar los diámetros de los taladros, se consumiría 7 402 m<sup>3</sup> con una reducción de 1 208 m<sup>3</sup> (14 %).



*Figura 238. Consumo Mensual de Agua Para la Instalación de Pernos de Roca con Equipo Manual y Mecanizado*  
Fuente: Elaboración propia.

**9.5.5 Consumo mensual de aceite hidráulico en la instalación de pernos de roca de 2,10 m (7 pies).** El aceite hidráulico mineral, se produce a partir del petróleo crudo, mientras que los aceites hidráulicos con ésteres organofosforados y de polialfaolefinas son manufacturados; en todas sus presentaciones tienen muchos ingredientes (mezcla compleja), a fin que mantengan la viscosidad aun a bajas temperaturas. El aceite hidráulico, puede contaminar al ambiente por derrames o salpicaduras, cuyos algunos ingredientes puede permanecer en superficie, mientras que otros se pueden llegar incluso a las aguas subterráneas.

El consumo de aceite hidráulico, es propio de los equipos mecanizados, en este caso, de la empernadora Robolt DS311, como puede observarse en la figura 239. Sin embargo, estos fluidos no son emitidos directamente al ambiente cuando los equipos operan, sino que circulan en un circuito cerrado, salvo que pueden producirse fugas y derrames. La vida útil de estos aceites es de 2000 horas, luego del cual, se tiene que reemplazar, el problema para el ambiente surge cuando tiene que eliminarse.

De la figura 239 se colige que, si actualmente en la minería peruana todos los pernos de 2,1 m se instalaran con la empernadora tomada como modelo, se gastaría 1 066 litros (282 galones) mensuales de aceite hidráulico y al optimizar los diámetros se los taladros 920 litros (243,06 galones), es decir, 145 litros menos (13,6 %).

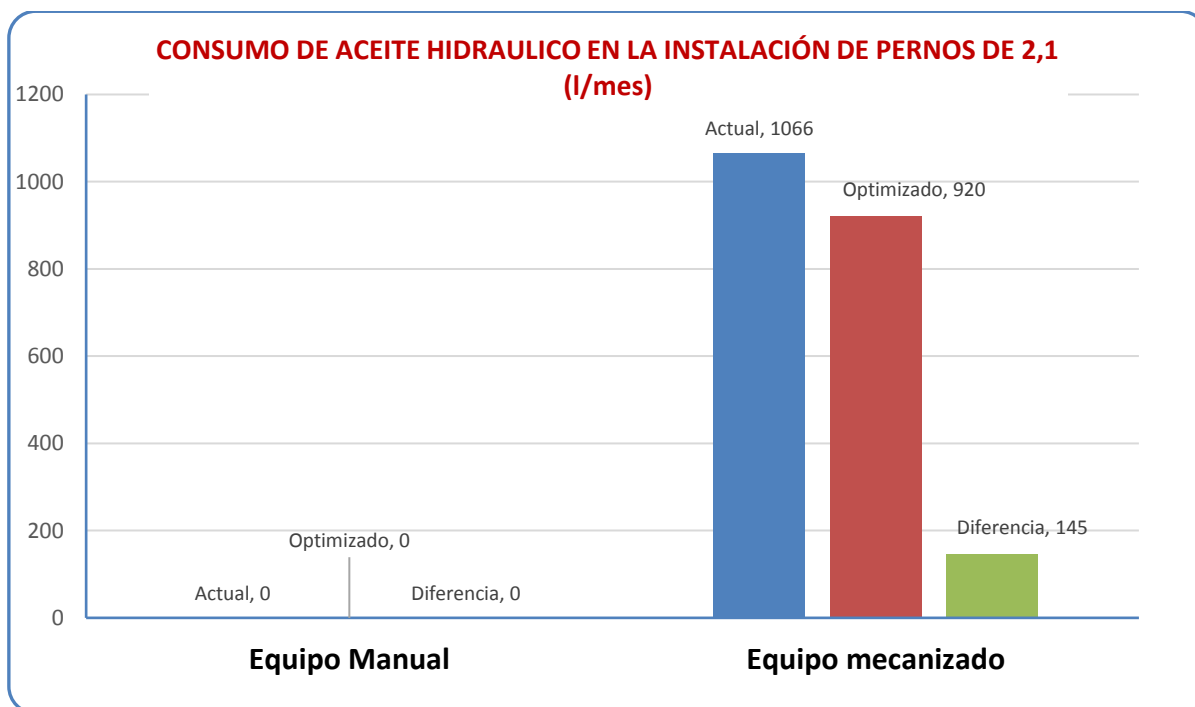


Figura 239. Consumo Mensual de Aceite Hidráulico en la Instalación de Pernos de Roca con Equipo Manual y Mecanizado

Fuente: Elaboración propia.

**9.5.6 Requerimiento de aire de ventilación en la instalación de pernos de roca de 2,10 m (7 pies).** En el ámbito minero, se sabe que la ventilación en las labores subterráneas es esencial para la subsistencia del personal y funcionamiento de las máquinas, el caudal necesario, por tanto, estará en función del número de personas y maquinarias diésel que operen en las labores subterráneas, dimensiones de las labores y emanaciones gases y polvo. Es obligatorio mantener una concentración mínima de 19,5 % de oxígeno en peso; en casos que así lo requieren, también se ventila con aire comprimido, usando para ello sopladores. El aire que se insufla en las labores, retorna al ambiente trayendo consigo una serie de contaminantes, como polvo de minerales, gases nocivos, calor, residuos de aceite en caso de equipos que operan con energía neumática, entre otros que son liberados al medio ambiente. Por consiguiente, si de alguna forma se redujera el aire de ventilación, en el presente caso optimizando el diámetro de los taladros, se estará contribuyendo en reducir la contaminación ambiental.

Existen normas legales que establecen el requerimiento de aire en una mina subterránea, en función de la altitud sobre el nivel del mar como ilustra la tabla 87 tomado del



Decreto Supremo 024-2016-EM. En el presente análisis, se está considerando que todos los pernos en análisis se están aplicando al nivel del mar, por consiguiente, requerimiento mínimo para el personal y maquinaria.

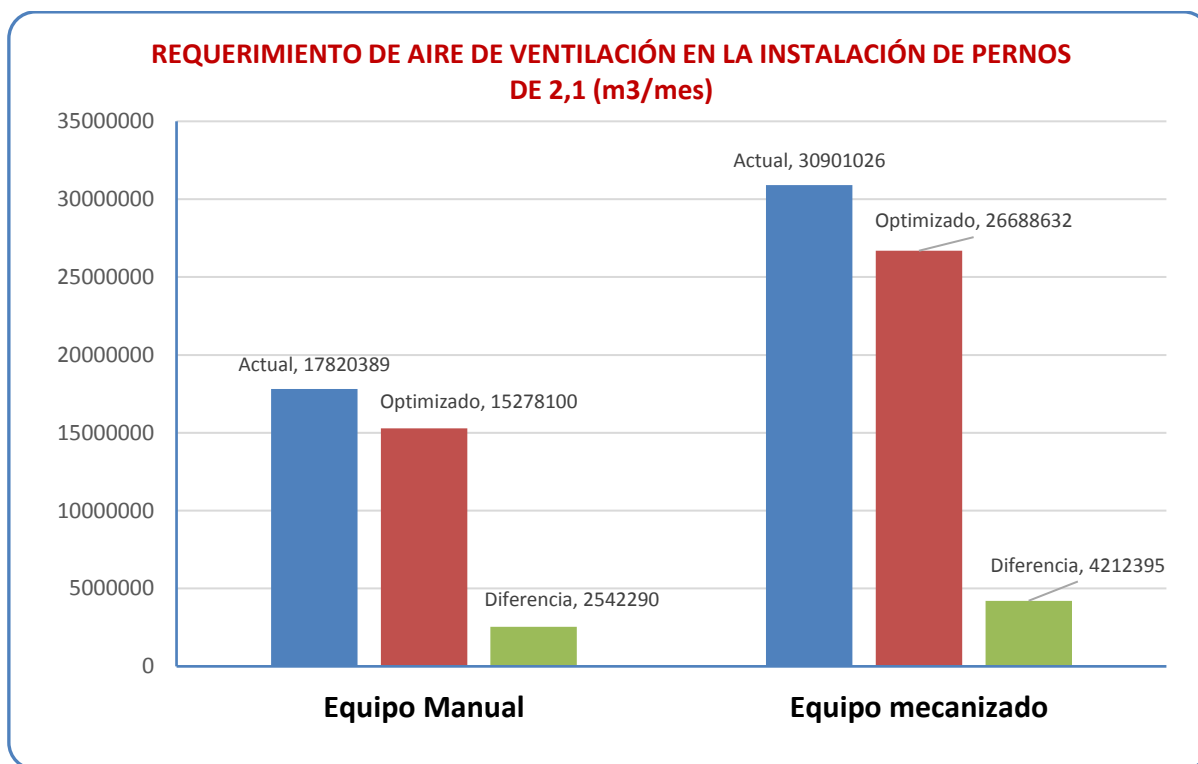
Tabla87  
*Requerimiento de Aire en la Ventilación Subterránea en Función de la Altitud Sobre el Nivel del Mar*

Altura (m.s.n.m.)	Requerimiento de aire por hombre por minuto (m <sup>3</sup> /min-H)	Incremento (%)	Equipo diésel
0 - 1500	3,00	0	≥ 3,00 por cada HP del motor
1500 - 3000	4,00	40	
3000 - 4000	5,10	70	
> 4500	6,00	100	

Fuente: D.S. 024-2016-EM

Con las consideraciones antes expuestas, y los datos mostrados en las tablas 82 y 84, a partir del estudio de tiempos se determinó el tiempo que demanda instalar cada tipo de perno, con cuyo resultado se dedujo las horas de trabajo que demandan mensualmente la instalación de los pernos, cuyos resultados ilustra la figura 240. Se observa que, el equipo mecanizado demanda mayor aire de ventilación, puesto que requiere para la parte diésel cuando se desplaza (en función de los 25 HP de su potencia) y el operador y su ayudante; mientras que en la instalación manual únicamente requieren aire el operador y su ayudante. Se determina que, actualmente la instalación mecanizada de pernos demanda mensualmente 30 901 026 m<sup>3</sup> de aire, mientras que la instalación manual 17 820 389 m<sup>3</sup>; 13 080 637 m<sup>3</sup> menos (42,3 %). Al optimizar los diámetros de los taladros, el equipo mecanizado demandaría de 26 688 632 m<sup>3</sup> y la instalación manual 15 278 100 m<sup>3</sup>; 11 410 532 m<sup>3</sup> menos (42,8 %).

Comparando la demanda de aire con los diámetros actuales de taladros para la instalación pernos con los diámetros de taladro optimizados, se arribó a las siguientes conclusiones: Para el caso de la instalación manual la demanda actual es de 17 820 389 m<sup>3</sup> y al optimizar los diámetros 15 278 100 m<sup>3</sup>, es decir, 2 542 289 m<sup>3</sup> menos (14,3 %). Asimismo, si la instalación fuera completamente mecanizada, el consumo de aire sería de 30 901 026 m<sup>3</sup> y al optimizar los diámetros de los taladros 26 688 632 m<sup>3</sup>, 4 212 395 m<sup>3</sup> menos (13,6 %).



*Figura 240.* Requerimiento de Aire de Ventilación Mensual en la Instalación de Pernos de Roca con Equipo Manual y Mecanizado  
Fuente: Elaboración propia.

**9.5.7 Emisión de aceite al medio ambiente en la instalación de pernos de roca de 2,10 m (7 pies).** Los aceites no se disuelven con agua, tampoco son biodegradables, forman películas impermeables impidiendo el paso del oxígeno y matando la vida tanto en el agua como en el suelo (destruyen el humus), diseminan productos tóxicos que pueden ser ingeridos en forma directa o indirecta por los seres humanos y animales. Los especialistas ambientales, indican que un litro de aceite contamina un millón de litros de agua (forma película de 5 mil m<sup>2</sup> en la superficie del agua), el aceite contiene una serie de sustancias tóxicas como el plomo, fósforo, azufre, cadmio y compuestos de cloro que contaminan gravemente las tierras, que se acentúa más por la acción de algunos aditivos (fenoles, aminas aromáticas, terpenos fosfatados o sulfonados, detergentes, cinc, etc.), que propician su penetración en el terreno hasta llegar a las aguas subterráneas. Cuando se destruyen los aceites por combustión, cada 5 litros de esta mezcla, emana sustancias nocivas y plomo contaminando 1 000 000 de m<sup>3</sup> de aire.

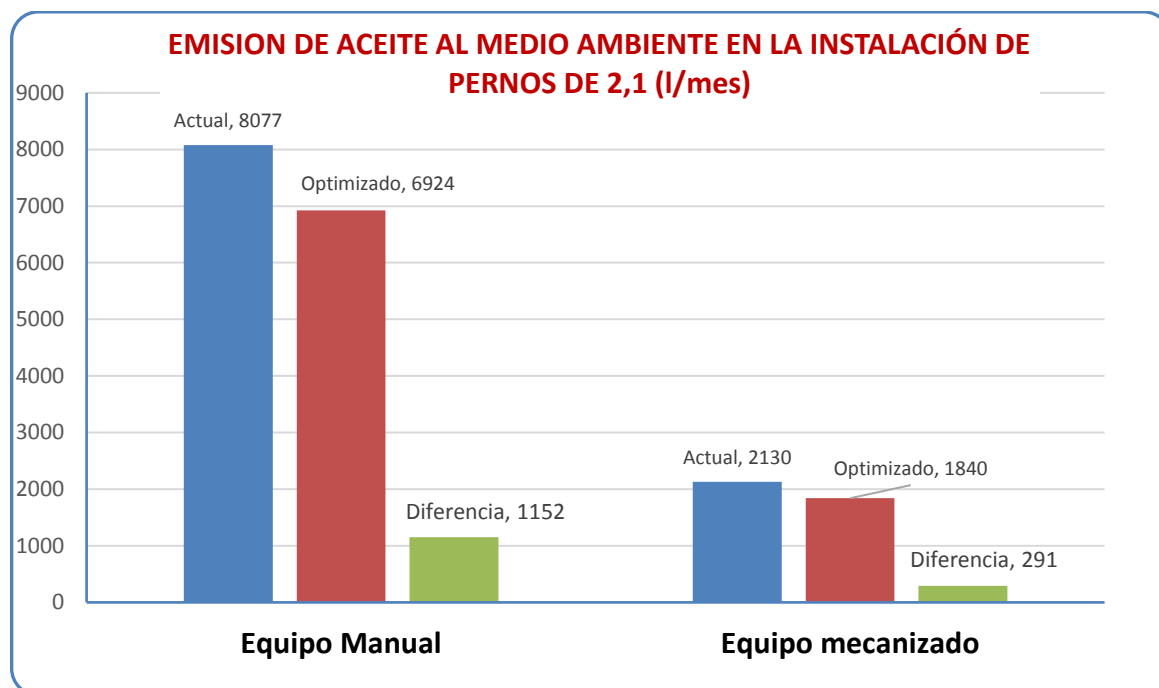
El plomo (contenido entre 1 á 1,5 % en los aceites) es el más volátil de los elementos metálicos contenidos en los aceites, que entra al ambiente en forma partículas subatómicas, perjudiciales para la salud de los seres humanos. Por tanto, las instalaciones donde se destruyen los aceites usados, por combustión, deben estar provistos de un costoso sistema depurador de gases o antes de su destrucción final hacer un refinamiento para eliminar sus componentes.

Estudios realizados en Holanda, han estimado que, al quemarse 70 000 toneladas de aceite usado por año, irían a la atmósfera 350 toneladas de plomo, que sumaría en 30 % a lo que emite el parque automotor (Depuroil, 1999).

Los efectos de los componentes de los aceites usados: Gases (aldehídos, cetonas, compuestos aromáticos y CO<sub>2</sub> son irritantes y actúan sobre el tejido respiratorio superior, ahogos, asma, bronquitis, efectos mutantes, cáncer. Elementos como el cloro, NO<sub>2</sub>, SH<sub>2</sub>, Sb, Cr, Ni, Cd, Mn y Cu dañan el tejido respiratorio superior y pulmonar. Otros elementos (CO, disolventes halogenados, SH<sub>2</sub> tienen efectos asfixiantes, impiden el transporte de oxígeno evitando la respiración de las células; los disolventes halogenados tienen efectos anestésicos y narcóticos que se acumulan en el hígado con posibles efectos cancerígenos. Metales como el Pb, Mn, Cd y Cr, tienen efectos tóxicos sobre los riñones, el Cd tiene efectos cancerígenos sobre la próstata y el Cr sobre el pulmón. Los compuestos aromáticos, como el tolueno, benceno, pueden provocar leucemias, otros hidrocarburos más ligeros se acumulan en la sangre y pueden producir parálisis (Depuroil, 1999).

Concatenando lo tratado en los acápites 9.3 y 9.4, donde se expuso la metodología de cálculo de éste y otros parámetros tanto para la instalación manual como mecanizado de pernos de roca. La figura 241, evidencia que la mayor emisión de aceite ocasionan los equipos manuales utilizados para la instalación de pernos, según este resultado, actualmente se estaría emitiendo a la atmósfera 8 077 litros mensuales de aceite, mientras que la instalación mecanizada 2 130 litros mensuales, 5 947 litros menos (73.6 %) que el método manual, esta diferencia se debe a que los equipos manuales se lubrican internamente inyectando una cantidad de aceite al flujo de aire que los acciona, mientras que los equipos mecanizados, usan aceite de lubricación únicamente para lubricar sus adaptadores.

Por otro lado, al optimizar los diámetros de los taladros, la emisión mensual de aceite se reduciría a 6 924 litros en caso de los equipos manuales, 1 152 litros menos de aceite (16,7 %). En caso de equipos mecanizados, se emitiría 1 840 litros, 291 litros menos (13,6 %). Estos resultados evidencian aún más, que es factible reducir la contaminación ambiental producida por la instalación de pernos de roca, optimizando los diámetros de los taladros.



*Figura 241.* Emisión de Aceite al Medio Ambiente Mensual en la Instalación de Pernos de Roca con Equipo Manual y Mecanizado  
Fuente: Elaboración propia.

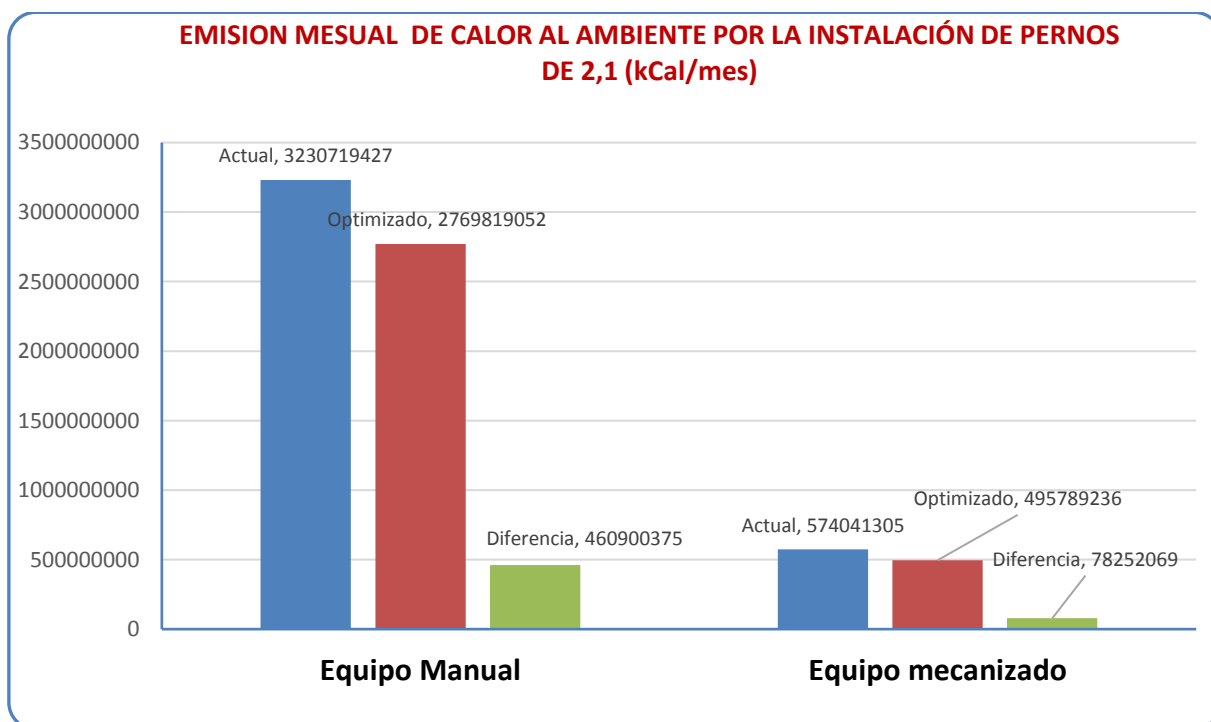
**9.5.8 Emisión mensual de calor al medio ambiente en la instalación de pernos de roca de 2,10 m (7 pies).** Toda máquina térmica, durante su funcionamiento emite al ambiente calor, que contribuye al calentamiento del planeta. Asimismo, la quema de combustibles fósiles que se emplean para el funcionamiento de estas máquinas, ha contribuido al incremento en grandes proporciones del dióxido de carbono, intensificando el efecto invernadero, que está incrementando la temperatura de la tierra con consecuencias impredecibles para vida. Una alternativa para reducir el calentamiento global, será utilizar energías limpias, como la eólica, solar, marina, gradiente geotérmica, biogás, entre otros (Buenas tareas, 2019).

El calor generado por el motor consume al menos el 60 % de la energía química del combustible en caso de los motores diésel, más de la mitad de la energía contenida en el combustible se pierde en forma de calor (Diariomotor, 2012).

Complementando lo analizado en los acápites 9.3 y 9.4, donde se hicieron los Cálculos de la emisión de calor para cada sistema de instalación de pernos de roca; se obtienen los resultados comparativos para ambos sistemas de instalación de pernos de roca. La figura 242 ilustra que los equipos manuales accionados por aire comprimido generado por un compresor (XAS 97 Dd), emiten mucho más calor al ambiente que las empernadoras (equipo mecanizado). Así, actualmente los equipos manuales estarían emitiendo al ambiente 3 230 719 427 kilocalorías por mes (más de 3 mil doscientos millones de kilocalorías), mientras que las

empernadoras 574 041 305 kilocalorías (más de 574 millones de kilocalorías), que viene a ser tan solo el 17,8 % de lo que emiten los equipos manuales.

Al optimizar los diámetros de los taladros, en caso de la instalación manual la emisión de calor mensual se reduciría a 2 769 819 052 (más de 2 700 millones de kcal) y en caso de los mecanizados, 495 789 236 kcal (cercano a 496 millones de kcal), lo cual significa 2 274 029 816 kcal menos (82,1 %).



*Figura 242.* Emisión de Calor al Medio Ambiente Mensual en la Instalación de Pernos de Roca con Equipo Manual y Mecanizado  
Fuente: Elaboración propia.

**9.5.9 Emisión mensual de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) al ambiente en la instalación de pernos de roca de 2,10 m (7 pies).** El dióxido de carbono, es un gas incoloro e inodoro, que forma parte de la naturaleza e indispensable para la existencia de la vida sobre la tierra; dado que, sin su existencia, no existirían las plantas, puesto que, gracias a este gas, las plantas elaboran la fotosíntesis. Por sí mismo, el CO<sub>2</sub> no es tóxico, es decir, no puede causar daños o envenenamiento por inhalación, dicho sea de paso, los seres vivos exhalan este gas durante su respiración. Se encuentra en el aire con una concentración que varía entre 300 y 550 ppm. La presencia del CO<sub>2</sub> desplaza el oxígeno del ambiente y en concentraciones altas (más de 30000 ppm), puede producir asfixia (Dióxido de carbono, s.f.).

Cuando los seres vivos respiramos, quemamos materias orgánicas con el oxígeno y desprendemos CO<sub>2</sub>. El CO<sub>2</sub> también se produce cuando se quema materias carbonatadas (carbón, madera, combustibles fósiles, etc.). Si la emisión del CO<sub>2</sub> no se ve compensada por su

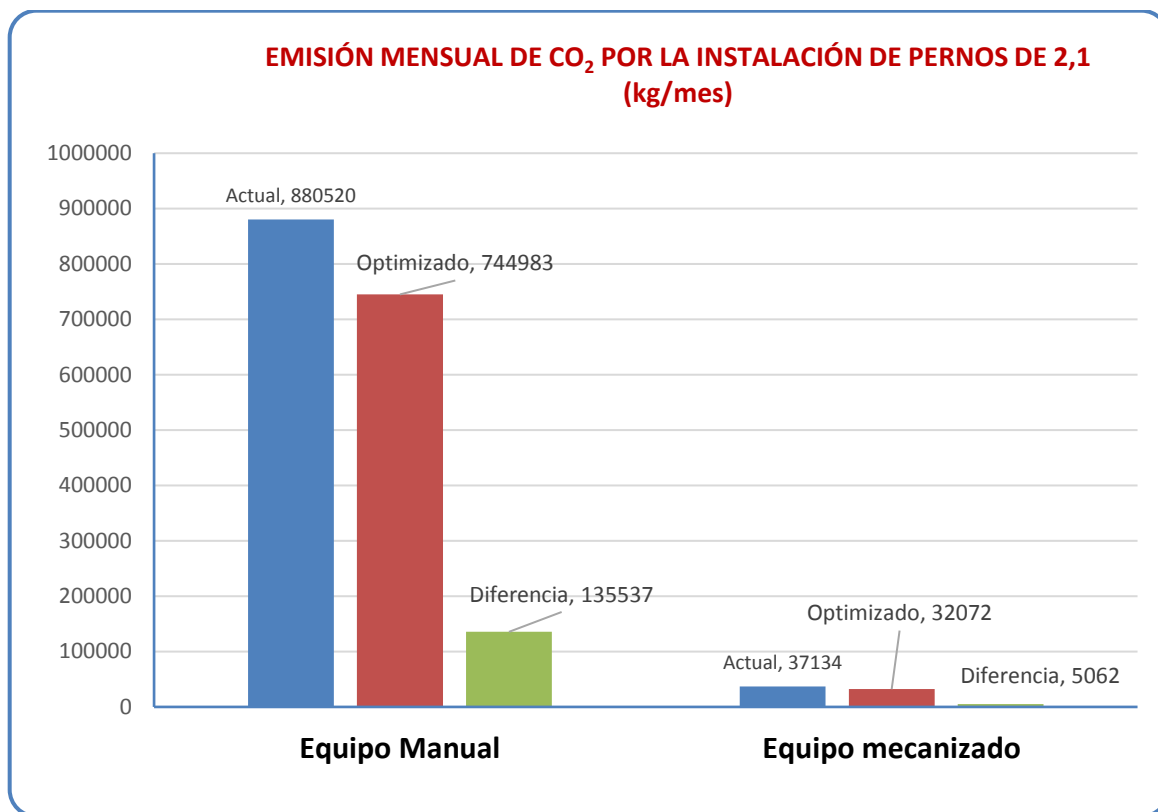
fijación, aumentaría su concentración en la atmósfera y contribuiría al calentamiento del planeta, dado que al no disiparse la radiación infrarroja provoca el efecto invernadero, se sabe que el CO<sub>2</sub> es el segundo gas atmosférico después del vapor de agua que contribuye a dicho fenómeno. Asimismo, al disolverse en el agua se transforma en ácido carbónico (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), que puede afectar algunos ecosistemas como los arrecifes de coral (Clickmica, 2016).

Las fuentes de emisión del CO<sub>2</sub>, son de dos tipos, las naturales y las antropogénicas. Entre las fuentes naturales, se encuentran la respiración animal, procesos de fosilización, incendios forestales o erupciones volcánicas. Entre las fuentes antropogénicas, se encuentran los procesos industriales, quema de residuos y desechos, quema de combustibles fósiles (obtención de energía, medios de transporte y otras actividades humanas). Las fuentes antropogénicas, no paran de crecer, actualmente la concentración del CO<sub>2</sub> atmosférico está alrededor de 390 – 400 ppm. No obstante, de múltiples iniciativas para reducir estas emisiones, como el protocolo de Kioto firmado en la década de los 90, no se alcanzado los objetivos trazados. Se pronostica que las emisiones de CO<sub>2</sub> aumenten hasta un 130 % hasta el 2050 (Sánchez, 2019).

El CO<sub>2</sub>, es uno de los gases responsables del efecto invernadero, que impide la disipación del calor recibido del sol hacia el espacio, que propician el incremento de calor en la atmósfera, como resultado se tiene en calentamiento global, que tiene consecuencias sobre el clima mundial y la vida en todo el planeta. La temperatura media global aumentó en 0,6 °C durante el siglo XX y se presume que el aumento en siglo XXI sea de entre 1 y 5 °C y se incremente la frecuencia y la intensidad de los fenómenos meteorológicos más extremos. El cambio climático es un problema que influye en todos los demás impactos medioambientales del CO<sub>2</sub>. En el ambiente marino, el sobrecalentamiento global influye en el deshielo del permafrost y los grandes casquetes glaciares, se estima que, durante el siglo XXI, el nivel de los océanos aumentará entre 9 y 88 cm, produciendo erosión y salinización de las tierras costeras. Muchos arrecifes de coral pierden su coloración y mueren, afectando muchas especies a los que les servía de alimento (Sánchez, 2019).

Este aspecto ha sido analizado en los acápites 9.3.2 y 9.4.2, tratado por separado para ambos métodos de instalación, analizando y estimando para cada caso la metodología de cálculo. En esta ocasión, se hace una discusión comparativa entre las emisiones que ocasionan ambos sistemas, cuyo resultado se presenta en la figura 243, donde se observa que el método manual produce mayor emisión de CO<sub>2</sub>. Así, actualmente se estaría emitiendo 880 520 kg (más de 880 toneladas) mensualmente, mientras que el sistema mecanizado emitiría únicamente 37 134 kg (un poco más de 37 toneladas), que viene a ser únicamente 4.2 % de lo que emite el

método manual. Al optimizar los diámetros de los taladros, la emisión se reduciría a 744 983 kg (casi 750 toneladas) en caso de los equipos manuales y, a 32 072 kg en caso de los mecanizados (4,3 %).



*Figura 243.* Emisión de Dióxido de Carbono al Medio Ambiente Mensual en la Instalación de Pernos de Roca con Equipo Manual y Mecanizado  
Fuente: Elaboración propia.



## **Capítulo 10**

### **Conclusiones y Recomendaciones**

#### **10.1 Conclusiones**

1. El diámetro de los taladros influye en la capacidad de anclaje de los pernos de roca. Los diámetros óptimos para instalar los pernos inflables Hydrabolt y X-Pandabolt (Swellex y otros), son respectivamente 38 y 40 mm. Para todos los materiales de acoplamiento de las barras helicoidales y todas las longitudes efectivas de anclaje, la mayor capacidad de anclaje de estos pernos se alcanza cuando el diámetro de taladro (tubo simulador) es de 32 mm. En el caso de los Split Sets, el diámetro óptimo para instalar estos pernos de 37,3 mm (37 mm) y no 38 mm como tienen establecido los fabricantes y proveedores.

2. La longitud efectiva de anclaje óptima de los pernos de roca es de 3 pies, excepto para los Split Sets (4 pies). Por consiguiente, usar longitudes superiores a éstas es innecesario. En caso que una situación real de sostenimiento excediera tal capacidad, lo más conveniente es jugar con la densidad de pernos (espaciamiento).

3. La elongación de los pernos, tiene un comportamiento lineal con la carga aplicada. La elongación de los pernos es importante para evitar la ruptura abrupta de los pernos, que puede comprometer la estabilidad de una excavación. Está demostrado que, el nivel de elongación incrementa el Work Index de los pernos. La combinación perno X-Pandabolt en tubo de 33 mm, es la que arroja menor elongación y, la que muestra mayor elongación es el perno X-Pandabolt en tubo simulador de 36 mm.

4. El acoplamiento de los pernos inflables y el Split Set, es imperfecto. El perno que muestra mejor acoplamiento, es el Hydrabolt, que en tubo simulador de 38 mm alcanza acoplarse 55,82 % mientras que el X-Pandabolt 47,54 %. En tubo simulador de 40 mm, alcanzan 60,93 % los Hydrabolt y 51,96 % los X-Pandabolt. El área de contacto de los Split Sets con la pared del tubo simulador es mayor en diámetro de 37,3 mm, con 42,04 %, mientras que, en tubos simuladores de 38,3 mm de diámetro es muy pobre (14,18 %), es decir el 85,87 % de su pared exterior queda sin hacer contacto debido a la ranura (14,6 mm) y generación de 2 grandes franjas de aberturas.

5. En ningún caso la barra helicoidal queda centrado respecto al eje del tubo

simulador (taladro). El envoltorio de plástico de los morteros encartuchados, afecta la capacidad de anclaje de las barras helicoidales, así como también el óxido de las barras y la porosidad de los morteros por el batido. La adherencia del cementicio en la barra helicoidal, es mayor que en la pared del tubo simulador, debido a los resaltes de la rosca continua que posee.

6. La metodología ideada y aplicada para el desarrollo del presente estudio en cuanto a la capacidad de anclaje de los pernos de roca, permite determinar su máximo valor y hacer estudios comparativos en igualdad de condiciones de estas herramientas de sostenimiento.

7. La metodología utilizada permite analizar el acoplamiento de los pernos en las paredes del taladro, así como determinar las propiedades de los morteros con que se instalan los pernos, que así lo requieren.

8. Existen una variedad de elementos de sostenimiento para evitar los desprendimientos de roca, en función del tipo de terreno. Dentro de ello, los pernos de roca son los elementos de sostenimiento de mayor aplicación, en sus diversos tipos y presentaciones.

9. Las curvas de la capacidad de anclaje de los pernos Hydrabolt en tubos de 36, 38 y 40 mm y X-Pandabolt en tubos de 38 y 40 mm, se muestran ascendentes hasta 3 pies de longitud efectiva de anclaje y para longitudes superiores se torna asintóticas para cargas cercanas a 16 ton.

10. Los pernos Hydrabolt tienen mayor capacidad de anclaje que los pernos X-Pandabolt (Swelllex), independiente del diámetro de taladro o tubo simulador donde se instalen.

11. Los pernos Hydrabolt en tubos de 33 mm tiene menor capacidad de anclaje, cuya curva tiene una pendiente muy baja hasta 3 pies de longitud efectiva de anclaje, a partir de la cual, empieza adquirir una pendiente muy pronunciada y no se torna asintótica.

12. La curva de la capacidad de anclaje de los pernos X-Pandabolt en tubos de 33 y 36 mm no es asintótica. En tubos de 33 mm, su capacidad de anclaje se mantiene en valores cercanos a 2 ton hasta 2,5 pies de LEA, a partir de la cual aumente en forma vertiginosa hasta 8,3 ton para 4 pies de LEA. En tubos de 36 mm, su capacidad de anclaje es siempre ascendente, alcanzando 13,8 ton para 4 pies de longitud efectiva de anclaje.

13. Para 2, 3 y 4 pies de LEA, las curvas correspondientes a la capacidad de anclaje de los pernos Hydrabolt tienen un comportamiento ascendente hasta 38 mm de diámetro, a partir del cual, se tornan asintóticas. Por consiguiente, se demuestra que el diámetro óptimo de taladro para instalar estos pernos es 38 mm. Para un pie de LEA, los Hydrabolt tienen un comportamiento distinto, su capacidad de mantiene bajo hasta 38 mm, a partir del cual se torna ascendente hasta 11,4 ton para 40 mm.

14. Las curvas de la capacidad de anclaje de los pernos X-Pandabolt para 1, 2 y 3 pies de LEA, tienen un comportamiento casi lineal en función del diámetro de taladro, alcanzando su máxima capacidad para diámetros mayores. Para 4 pies de LEA, la curva se comporta en forma ascendente hasta 40 mm de diámetro de taladro, a partir del cual se torna asintótica. Por consiguiente, se demuestra que el diámetro óptimo para los X-Pandabolt es 40 mm.

15. Todo perno tiene longitud muerta, es decir, la longitud del perno que hace anclaje. En el caso de los pernos estudiados, se tienen: Split sets, 18 cm; Hydrabolt, 13,7 cm; X-Pandabolt, 13,7 cm y las barras helicoidales, 15 cm.

16. Al inflar los pernos de roca inflables dentro de los tubos simuladores o taladros, se generan franjas de aberturas a lo largo de dichos pernos, que varían en número y ancho, de acuerdo a su tipo y diámetro del tubo simulador o taladro donde se instalen. Por ejemplo, en tubos simuladores de 38 mm se generan 3 aberturas, uno a la izquierda y dos a la derecha del pliegue, mirando de la cabeza hacia la cola de los pernos.

17. Los cartuchos de resina, amortiguan los impactos mejor que cualquier otro mortero, no siendo así cuando es expuesto a temperaturas superiores a los 400 °C, que lo convierte en ceniza, perdiendo todas sus propiedades físicas y químicas.

18. El envoltorio plástico de los cartuchos de resina, a pesar de tener menor espesor tienen mayor rigidez que los de los cartuchos de cementicio, inclusive todo el envoltorio vacío puede mantenerse erguido, lo que no ocurre con el envoltorio del cementicio.

19. El material de acoplamiento o mortero con que se instalan las barras helicoidales, introducen burbujas de aire en su masa durante el batido (por el mecanismo de rotopercusión). El número y tamaño de los poros es mayor en la lechada de cemento, seguido por el cementicio, por consiguiente, el mortero que queda menos poroso es la resina.

20. La porosidad de los morteros aumenta como aumenta el diámetro del tubo simulador o taladro. Es decir, en diámetros más pequeños la porosidad es menor.

21. Los contaminantes en la superficie de los pernos como el óxido, pinturas, grasas, aceites, polvo, etc. Así como en las paredes de los taladros, como el detritus de perforación, agua, arcilla, etc. son altamente perjudiciales sobre la capacidad de anclaje de los pernos; puesto que reducen la adherencia y acoplamiento.

22. Cuando los pernos se ensayan en un terreno muy bueno (entre la clase I a II), muestran capacidades de anclaje muy similares a los obtenidos en el laboratorio, puesto que los tubos simuladores se asemejan a la roca clase I.

23. El número de pernos en una determinada área sostenida, se reduce al instalarlos en diámetros óptimos de taladro (tubos) respecto a los diámetros actuales; en el caso de los Split sets, 18 %; BHCC, 29 %; BHCR, 15 %, BHLC, 23 43 %; Swellex, 5 %. Los pernos Hydrabolt son los únicos pernos que se viene instalando en diámetro óptimo actualmente, por lo que la reducción equivale a 0 %.

24. El consumo mensual de pernos de roca en la minería peruana actualmente es de 436344 unidades, disgregados de la siguiente manera: 47,07 % de Split Sets, 19,46 % de barras helicoidales, 6,69 % de pernos Swellex y 26,78 % de Hydrabolt.

25. La longitud de perno de mayor aplicación es la de 2,10 m (7 pies), con un promedio de 79 % respecto a las otras longitudes que van de 0,3 a 3,0 m.

26. En la minería peruana, la instalación de pernos de roca se lleva a cabo tanto con equipo manual (jackleg) como mecanizado (empernadoras o jumbos), en una misma operación minera se aplican ambos métodos de instalación.

27. La optimización de los diámetros de los taladros, contribuye en la reducción de emisión de contaminantes al medio ambiente y consumo de recursos naturales como agua y aire.

28. La instalación de pernos de roca produce contaminación ambiental, tanto al aire, agua y suelo, por las emisiones que producen el funcionamiento de equipos, transpiración del personal, uso de materiales de acoplamiento de pernos y captación de recursos como el agua y retronarlo al ambiente contaminado.

29. Optimizar los diámetros de los taladros donde se instalan los pernos de roca, implica la reducción de horas máquina y horas hombre, menores insumos, menor consumo de agua y aire.

30. La instalación manual demanda mayor cantidad de horas que la instalación mecanizada. Haciendo análisis para el consumo mensual de pernos de 2,10 m, se demuestra que la instalación manual demanda 49501 horas y la mecanizada, 11839 horas; y al optimizar los diámetros de taladros, estas cantidades se reducen a 42439 y 10226 horas, respectivamente, significando una reducción porcentual de 14,2 % y 16,6 %.

31. El consumo mensual de combustible diésel en la instalación de pernos de roca de 2.10 m, asciende a 95042 y 3715 galones, respectivamente para el método manual y mecanizado. Al optimizar los diámetros de los taladros, hay una reducción porcentual de 14,3 % y 13,6 %, respectivamente.

32. La instalación de pernos de roca demanda un consumo mensual de agua de 34748 y 8610 m<sup>3</sup> por el sistema mecanizado y manual, respectivamente. Cuando se optimizan los diámetros de los taladros, este consumo se reduce a 30078 y 7402 m<sup>3</sup>, respectivamente.

33. El consumo de aceite hidráulico es propio de la instalación mecanizada de pernos, este sistema consume 282 galones por mes y al optimizar los diámetros de los taladros, se reduce a 243 galones, es decir 39 galones menos (13,6 %).

34. La instalación mecanizada de pernos de roca demanda mayor cantidad de ventilación que la instalación manual, siendo así, el primer sistema consume 30901026 m<sup>3</sup>/mes, mientras que el segundo, 17820389 m<sup>3</sup>/mes. Al optimizar los diámetros de los taladros, estos consumos se reducen a 26688832 y 15278100 m<sup>3</sup>/mes, respectivamente.

35. La instalación manual de pernos de roca de 2,10 m, emite al ambiente 2134 galones/mes de aceite de lubricación, mientras que el método mecanizado 563 galones/mes (26,4 % de lo que emite el método manual). Optimizando los diámetros de los taladros, el primer caso se reduce a 1829 gal/mes y el segundo a 486 gal/mes, significando una reducción de 304 y 77 gl/mes, respectivamente.

36. La emisión de calor es muy superior con la instalación manual, superando los 3230 millones de kCal/mes, respecto a los más de 574 millones de kCal/mes de la instalación mecanizada. Cuando se optimizan los diámetros de los taladros, el primer caso se reduce en más de 460 millones de kCal/mes y el segundo en más de 78 millones de kCal/mes.

37. La instalación manual de pernos de roca emite actualmente más de 880 t/mes de CO<sub>2</sub> al ambiente, mientras que método mecanizado, más de 37 t/mes. La optimización de los diámetros de los taladros, reduce esta emisión a 745 t/mes, es decir 135 t/mes menos en caso de la instalación manual y en caso de la instalación mecanizada la reducción es de 5 t/mes.

## **10.2 Recomendaciones**

1. Sería recomendable ampliar el estudio con otros tipos y tamaños de pernos, a fin de tener a la vista sus bondades comparativas, para una adecuada selección de estos elementos de sostenimiento. Cabe destacar que, el presente estudio se ha realizado con pernos de roca de mayor aplicación en la minería y construcción civil.

2. Procurar utilizar para las pruebas los mejores productos de los que se disponga, para facilitar su ejecución y obtener los mejores resultados.

3. Probar otros tipos de acero para la fabricación de los pernos Hydrabolt y X-Pandabolt, a fin de reducir las franjas de aberturas que se generan durante el inflado para mejorar sus capacidades de anclaje.
4. Realizar estudios adicionales con otros diámetros de pernos, puesto que presente estudio se realizado con pernos de diámetros de mayor aplicación en la industria de la excavación.
5. Realizar estudios adicionales de laboratorio para determinar el Work Index de los pernos de mayor aplicación en la minería y construcción civil.
6. Para establecer los factores de corrección para aplicar los pernos de roca en una situación real de sostenimiento en base a los resultados de laboratorio, amerita desarrollar un estudio de la capacidad de anclaje de los pernos en función del tipo de roca, que bien podría ser una tesis doctoral.
7. Sería conveniente realizar un estudio referente al efecto del centrado de las barras helicoidales respecto al eje de los taladros sobre su capacidad de anclaje.
8. Realizar estudio del nivel de contaminación producida por las perforadoras neumáticas en minería y construcción civil, es decir, perforación para voladura (primaria y secundaria), sostenimiento y otros usos. Haciendo extensivo el estudio, para la perforación rotativa, cuya lubricación de los rodamientos de los triconos se realiza inyectando aceite al flujo de aire de barrido.
9. Rediseñar las perforadoras que lubrican sus partes inyectando aceite al flujo de aire de accionamiento y/o barrido, a fin de evitar la emisión de aceite al medio ambiente. Es decir, estas perforadoras deben estar provistos de depresores o captadores de aceite en la descarga, a fin que, después de su accionamiento, el aire mezclado con aceite no se expulse deliberadamente al ambiente.

## Referencias

- Abril, E. (2007). *Macizos Rocosos*. Córdoba Argentina: Facultad de Ciencias Exactas.
- Adherencia entre el hormigón y el acero*. (05 de febrero de 2012). Obtenido de Google: <https://www.elconstructorcivil.com/2012/02/adherencia-entre-el-hormigon-y-el-acero.html>
- Airgo2. (13 de noviembre de 2018). *Causas antropogénicas de la contaminación del aire: Quema de combustibles fósiles*. Obtenido de Google: <https://www.airgo2.com/es/contaminacion-aire/causas/antropogenicas/quema-combustibles-fosiles/>
- Alfonso Avila , N. Z. (2016). *Principios básicos para la gestión ambiental*. Colombia: Alfaomega S.A. Colombiana.
- Atlas Copco. (2003). Rock reinforcement. *Tunnelbuilder for Atlas Copco*, 5 - 12.
- Birön, C., & Arioglu, E. (1987). *Diseño de ademes en minas*. México1: Limusa S.A.
- Buenas tareas. (2019). *Máquinas térmicas y la preservación del medio ambiente*. Obtenido de Google: [https://www.academia.edu/17532779/Maquinas\\_t%C3%A9rmicas\\_y\\_preservaci%C3%B3n\\_del\\_medio\\_ambiente](https://www.academia.edu/17532779/Maquinas_t%C3%A9rmicas_y_preservaci%C3%B3n_del_medio_ambiente)
- Cáceres C., M. (2002). New Austrian Tunnelling Method (NATM). *Bit - La revista técnica de la construcción*.
- castem. (2019). *Cartuchos de cemento cem com*. Obtenido de Google: <http://castem.com.pe/productos/castem/cartuchos-de-cemento-cem-con.html>
- Cemento portland*. (s.f.). Obtenido de wikipedia: [https://es.wikipedia.org/wiki/Cemento\\_Portland](https://es.wikipedia.org/wiki/Cemento_Portland)
- Clickmica. (2016). *¿Es un contaminante atmosférico del dióxido de carbono?* Obtenido de Google: <https://clickmica.fundaciondescubre.es/conoce/100-preguntas-100-respuestas/contaminante-atmosferico-dioxido-carbono/>
- Coates, D. F. (1970). *Fundamentos de mecánica de rocas*. Toronto Canadá: Centro de Investigación minera.
- Conesa Fernandez, V. (2010). *Guía metodológica para la evaluación del impacto ambiental*. Madrid - España: Ediciones Mundi - Prensa.
- Delizamiento, tipos de deslizamientos y movimientos en masa*. (2018). Obtenido de Google: <https://geologiaweb.com/ingenieria-geologica/deslizamientos/tipos-de-deslizamientos/>
- Depuroil. (1999). *riesgos medio ambientales de los aceites industriales*. Obtenido de Google: <http://www.euskalnet.net/depuroilsa/Riesgosmedioambiente.html>
- Diariomotor. (202 de octubre de 2012). *Los límites de la eficiencia térmica en motores gasolina y diésel*. Obtenido de Google: <https://www.diariomotor.com/tecmovia/2012/10/02/los-limites-de-la-eficiencia-termica-en-motores-gasolina-y-diesel/>
- Dióxido de carbono*. (s.f.). Obtenido de Wikipedia: [https://es.wikipedia.org/wiki/Di%C3%B3xido\\_de\\_carbono](https://es.wikipedia.org/wiki/Di%C3%B3xido_de_carbono)
- El concreto. (10 de enero de 2009). *Clasificación de los cemento portland*. Obtenido de Google: <http://elconcreto.blogspot.com/2009/01/clasificacion-de-los-cementos-portland.html>
- Fernández Cauti, F. D. (1998). Tesis. *Bulones de eucalipto como alternativa de sostenimiento*. Lima, Lima, Perú: Universidad nacional mayor de san marcos.



- Giraldo Paredez, E. M. (2011). Propiedades mecánicas y de sostenimiento de los pernos de roca inflables cargados y descargados. *Revista del IIGEO*, 60 - 65.
- Giraldo Paredez, E. M. (2012). Capacidad de sostenimiento de los pernos de roca en función de sus longitudes. *Revista del instituto de ingenieros de minas del Perú*, 48 - 51.
- Giraldo Paredez, E. M. (2012). Rendimiento de pernos de roca de mayor aplicación en el Perú. *Revista del IIGEO*, 25 - 40.
- Giraldo Paredez, E. M. (2013). Efecto de la presión del agua en el interior de los pernos de roca inflables sobre su capacidad de anclaje. *Revista del IIGEO*, 47 - 57.
- Giraldo Paredez, E. M. (2015). Capacidad de sostenimiento de las placas para pernos de roca. *Revista del IIGEO*, 49 - 59.
- Giraldo Paredez, E. M. (2016). Identificación de factores para reducir accidentes por desprendimiento de rocas en minería subterránea. *Revista del IIGEO*, 47 - 55.
- Giraldo, E. (09 de marzo de 2010). Las máquinas tuneladoras tipo TBM como alternativa al sistema de perforación y voladura para la excavación de túneles caso: Desarrollo de túneles en Yuncán. (*Tesis de Maestría*). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Lima, Perú.
- Giraldo, E. (2011). Variabilidad de la capacidad de sostenimiento de un macizo rocoso Vs longitud de pernos de roca. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica*, 14(28). Lima. Obtenido de file:///C:/Users/USER/Downloads/653-Texto%20del%20art%C3%ADculo-2124-1-10-20120412%20(3).pdf
- Giraldo, E. (2014). Propiedades mecánicas y de sostenimiento de las placas para pernos de roca hydrabolt. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica*, 17(33). Lima. Obtenido de <https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/iigeo/article/view/11497>
- Giraldo, E. (2014). Propiedades mecánicas y de sostenimiento de las placas para pernos de roca hydrabolt. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica*, 17(33). Lima. Obtenido de <https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/iigeo/index>
- Goodman, R. (1980). *Introduction in Rock and Soil*. California USA: John Wiley & Sons.
- Hobst, L., & Zajíc, J. (1983). *Anchoring in rock and soil*. New York: Elsevier Scientific Publishing Co. Inc.
- Hoek, E. (2006). *Practical Rock Engineering*. North Vancouver: Rocscience.
- Hoek, E., & Brown, E. (1985). *Excavaciones subterráneas en roca*. México D.F.: McGraw Hill.
- Hoek, E., Kaiser, P., & Bawdens, W. F. (2006). *Visualization of rock mass classification systems*. Obtenido de Google: [https://www.researchgate.net/publication/225896012\\_Visualization\\_of\\_rock\\_mass\\_classification\\_systems](https://www.researchgate.net/publication/225896012_Visualization_of_rock_mass_classification_systems)
- Impacto ambiental*. (s.f.). Obtenido de Wikipedia: [https://es.wikipedia.org/wiki/Impacto\\_ambiental](https://es.wikipedia.org/wiki/Impacto_ambiental)
- Ingeniería ambiental*. (s.f.). Obtenido de Wikipedia: [https://es.wikipedia.org/wiki/Ingenier%C3%ADa\\_ambiental](https://es.wikipedia.org/wiki/Ingenier%C3%ADa_ambiental)
- Inspiration. (2019). *Combustibles fósiles*. Obtenido de Google: <https://www.inspiration.org/cambio-climatico/efecto-invernadero/combustibles-fosiles>
- International Rollforms, i. (9 de febrero de 2018). *Split Set Stabilizers / friction bolts*. Obtenido de google: <https://www.ptpma.co.id/featured/split-set-stabilizers-friction-bolts/>
- ispch. (2009). *Sección química ambiental: Contaminación ambiental*. Obtenido de Google: [http://www.ispch.cl/saludambiental/ambiente/quimica\\_ambiental/contaminacion](http://www.ispch.cl/saludambiental/ambiente/quimica_ambiental/contaminacion)

- Julián Perez y Ana Gardey. (2009). *Definición de medio ambiente*. Obtenido de Google: <https://definicion.de/medio-ambiente/>
- Loma Negra. (2016). *Cemento portland características y recomendaciones de uso*. Obtenido de Google: [file:///C:/Users/elvira/Downloads/CEMENTO\\_PORTLAND\\_CHARACTERISTICAS\\_Y\\_RECOM.pdf](file:///C:/Users/elvira/Downloads/CEMENTO_PORTLAND_CHARACTERISTICAS_Y_RECOM.pdf)
- López Jimeno, C. (1999). *Manual de estabilización y revegetación de taludes*. Madrid España: Entorno gráfico S.L.
- Macizo. (s.f.). Obtenido de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Macizo>
- Megaw, T. M., & Bartlett, J. V. (1988). *Tuneles planificación, diseño y construcción*. México D.F.: Limusa S. A.:
- Minova. (setiembre de 2009). *Swellex*. Obtenido de Google: <http://www.cdiem.cl/wp-content/uploads/2012/08/Catalogos/Pernos/Fricci%C3%B3n/SwellexRockBoltsSpecifications-Sp.pdf>
- minova. (04 de mayo de 2011). *Cartuchos de resina lokset*. Obtenido de Google: <http://www.cdiem.cl/wp-content/uploads/2012/08/Catalogos/Catalogos%20productos%20MMS%20S.A/Resinas%20Lokset.pdf>
- Mintech. (2014). *Cartuchos de resina*. Obtenido de google: <http://mintech.com.pe/productos.html>
- Palmstrom, A., & Broch, E. (2006). Use and Misure of rock classification systems with particular reference to the Q-system. *Tunnelling and underground space technology*, 575 - 593.
- Pradyot, P. (2010). *Contaminantes químicos en el aire, agua, suelo y desechos sólidos*. Florida USA: CRC Press.
- Prezi. (27 de abril de 2014). *Ambiente físico y biológico*. Obtenido de Google: <https://prezi.com/d34jv2miqteb/ambiente-fisico-y-biologico/>
- prodac. (2019). *Resina poliéster Lokset*. Obtenido de Google: <https://prodac.bekaert.com/es-MX/mineria/estabilizacion-del-macizo-rocoso/grout-quimico/resina-poliester-lokset>
- Remicsa. (2015). *Cartuchos de resina de fragua rápida*. Obtenido de Google: <https://www.remicsa.com/productos/cartucho-de-resina/>
- RT. (23 de febrero de 2014). *Ciudades subterráneas: La urbanización del futuro*. Obtenido de Google: <https://actualidad.rt.com/sociedad/view/120665-ciudades-subterraneas-urbanizacion-montreal-paris>
- Ruiz L., R. (2012). Análisis meso mecánico de la adherencia en estructuras de hormigón armado. *Asociación argentina de mecánica computacional*, 1749 -1766.
- Sánchez, J. (03 de abril de 2019). *El impacto medioambiental del dióxido de carbono*. Obtenido de Google: <https://www.ecologiaverde.com/el-impacto-medioambiental-del-dioxido-de-carbono-1334.html>
- Singh, B., & Goel, R. (1999). *Rock Mass Clasification*. Roorkee India: Elsevier Science.
- Sistema autoperforante DSI Underground*. (22 de agosto de 2017). Obtenido de Google: <https://www.dsiunderground.cl/productos/sistema-autoperforante/>
- UNED. (2014). *Bases de la ingeniería ambiental*. Madrid España: Librería UNED.

**ANEXOS**

## **ANEXO A**

### **MODELOS DE FORMATOS DE COPILACION Y PROCESAMIENTO DE DATOS DE LOS PERNOS ESTUDIADOS**

**A – 1: MODELOS DE COMPILACION Y PROCESAMIENTO DE DATOS DE LOS SPLIT SETS**

**A – 2: MODELOS DE COMPILACION Y PROCESAMIENTO DE DATOS DE LOS PERNOS INFLABLES HYDRABOLT**

**A – 3: MODELOS DE COMPILACION Y PROCESAMIENTO DE DATOS DE LOS PERNOS INFLABLES X-PANDABOLT (SWELLEX)**

**A – 4: MODELOS DE COMPILACION Y PROCESAMIENTO DE DATOS DE LAS BARRAS HELICOIDALES INSTALADAS CON CARTUCHOS DE CEMENTICIO**

**A – 5: MODELOS DE COMPILACION Y PROCESAMIENTO DE DATOS DE LAS BARRAS HELICOIDALES INSTALADAS CON CARTUCHOS DE RESINA**

**A – 6: MODELOS DE COMPILACION Y PROCESAMIENTO DE DATOS DE LAS BARRAS HELICOIDALES INSTALADAS CON LECHADA DE CEMENTO**

**A – 1: MODELO DE COMPILACION DE DATOS DE LOS SPLIT SETS (DTS\* = 37 MM)**

LEA (pies)	NUM. DE MUESTRA	CODIGO DE MUESTRA	PRUEBA DE ARRANQUE - CARGA Y ELONGACION																								OBSERVACIONES		
			TON												ELONGACION (mm)														
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12			
1	1	SS-37-1-1	0	1	2	3									46,21	46,31	46,8	47,53										Se uso la escala RCH - 202 del manómetro para toda la prueba. El ensayo se llevó a cabo el 03/06/15. Las pruebas se suspendian cuando el perno empezaba a salirse del tubo simulador y la carga descendía.	
	2	SS-37-1-2	0	1	2	3									46,56	46,56	46,98	47,69											
	3	SS 37-1-3	0	1	2	2,2										27,53	27,62	28,29	28,76										
2	1	SS-37-2-1	0	1	2	3	3,5								46,25	46,25	46,47	47,06	47,71									Las pruebas se suspendian cuando el perno empezaba a salirse del tubo simulador y la carga descendía. El ensayo se llevó a cabo el 03/06/15	
	2	SS-37-2-2	0	1	2	3	4	5							36,86	36,9	37,3	38,06	38,9	39,75									
	3	SS- 37-2-3	0	1	2	3	4	5	5,5						18,91	18,92	19,04	20,05	20,74	21,35	22,11								
3	1	SS-37-3-1	0	1	2	3	4	5	6						36,93	36,93	37,35	38,04	38,87	39,66	40,64							Las pruebas se suspendian cuando el perno empezaba a salirse del tubo simulador y la carga descendía. El ensayo se llevó a cabo el 03/06/15	
	2	SS-37-3-2	0	1	2	3	3,5								36,91	37,02	37,55	38,24	39,25										
	3	SS-37-3-3	0	1	2	3	3,5								36,87	36,94	37,46	38,19	39										
4	1	SS-37-4-1	0	1	2	3	4	5	6	7	7,5				46,45	46,45	46,79	47,51	48,23	48,95	49,9	50,79	51,65					Las pruebas se suspendian cuando el perno empezaba a salirse del tubo simulador y la carga descendía. El ensayo se llevó a cabo el 03/06/15	
	2	SS-37-4-2	0	1	2	3	4	5	6	7	7,5				37,01	37,06	37,53	38,26	39,05	39,8	40,74	41,53	42,2						
	3	SS-37-4-3	0	1	2	3	4	5	6	7					37,07	37,21	37,92	38,62	39,44	40,19	41,02	41,85							

\*DTS = Diámetro del tubo simulador

**A – 1: MODELO DE PROCESAMIENTO DE DATOS DE LOS SPLIT SETS (DTS = 37 MM)**

LEA (pies)	NUM. DE MUESTRA	CODIGO DE MUESTRA	PRUEBA DE ARRANQUE - CARGA Y ELONGACIÓN																								OBSERVACIONES
			CARGA AJUSTADA SEGÚN CERTIFICACIÓN UNI, Y = 0.9924 X (ton)												ELONGACION (mm)												
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	1	SS - 37 - 1 - 1	0	0,992	1,985	2,977									0	0,1	0,59	1,32									
	2	SS - 37 - 1 - 2	0	0,992	1,985	2,977									0	0	0,42	1,13									
	3	SS - 37 - 1 - 3	0	0,992	1,985	2,183									0	0,09	0,76										
	PROMED.		0	0,99	1,98	2,71									0	0,06	0,59	1,23									
2	1	SS - 37 - 2 - 1	0	0,992	1,985	2,977	3,473								0	0	0,22	0,81	1,46								
	2	SS - 37 - 2 - 2	0	0,992	1,985	2,977	3,97	4,962							0	0,04	0,44	1,2	2,04	2,89							
	3	SS - 37 - 2 - 3	0	0,992	1,985	2,977	3,97	4,962	5,458						0	0,01	0,13	1,14	1,83	2,44	3,2						
	PROMED.		0	0,99	1,98	2,98	3,8	4,96	5,46						0	0,02	0,26	1,05	1,78	2,67	3,2						
3	1	SS - 37 - 3 - 1	0	0,992	1,985	2,977	3,97	4,962	5,954						0	0	0,42	1,11	1,94	2,73	3,71						
	2	SS - 37 - 3 - 2	0	0,952	1,903	2,855	3,331								0	0,11	0,64	1,33	2,34								
	3	SS - 37 - 3 - 3	0	0,952	1,903	2,855	3,331								0	0,07	0,59	1,32	2,13								
	PROMED.		0	0,97	1,93	2,9	3,54	4,96	5,95						0	0,06	0,55	1,25	2,14	2,73	3,71						
4	1	SS - 37 - 4 - 1	0	0,992	1,985	2,977	3,97	4,962	5,954	6,947	7,443				0	0	0,34	1,06	1,78	2,5	3,45	4,34	5,2				
	2	SS - 37 - 4 - 2	0	0,992	1,985	2,977	3,97	4,962	5,954	6,947	7,443				0	0,05	0,52	1,25	2,04	2,79	3,73	4,52	5,19				
	3	SS - 37 - 4 - 3	0	0,992	1,985	2,977	3,97	4,962	5,954	6,947					0	0,14	0,85	1,55	2,37	3,12							
	PROMED.		0	0,99	1,98	2,98	3,97	4,96	5,95	6,95	7,44				0	0,06	0,57	1,29	2,06	2,8	3,59	4,43	5,2				

### A – 2: MODELO DE COMPILACION DE DATOS DE LOS PERNOS HYDRABOLT (DTS = 36 MM)

LEA (pies)	NUM. DE MUESTRA	PRUEBA DE ARRANQUE - CARGA Y DESPLAZAMIENTO																								OBSERVACIONES	
		TON												DESPLAZAMIENTO (mm)													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
1	1	0	2	4	6	8	10	11						17,2	17,43	17,83	18,32	18,39	18,8	20							Escala del manómetro RCH - 202 para toda la prueba del 29/08/14.
	2	0	2	4	6	8							17,01	17,01	17,44	17,8	18,13									Con presión interior post prueba	
	3	0	2	4	6	8	10	11					17,26	17,29	17,76	18,19	18,66	19,2	19,7							Baja presión post prueba	
	4	0	2	4	6	8	9						17,44	17,5	17,9	18,33	19	19,38								Con presión interior post prueba	
2	1	0	2	4	6	8	10	12	14	16			16,97	17	17,22	18,26	18,9	19,72	21,34	25,3						Fisuramiento dentro de la cabeza del perno durante el ensayo	
	2	0	2	4	6	8	10	12	14	15			16,9	16,9	17,2	17,6	18,15	18,9	19,86	21,65	23,9						
	3	0	2	4									17,12	17,17	17,6											Los pernos tenían manchas de pintura. Sin presión post prueba	
	4	0	2	3									16,83	16,96	18,53												
3	1	0	2	4	6	8	10	11					16,86	16,9	17,44	18,16	18,97	19,98	21,4							Con presión interior durante el chequeo post prueba	
	2	0	2	4	6	8	10	12	14	16	17		17,04	17,1	17,41	17,84	18,26	18,79	19,54	20,6	22,94	22,54				Rotura de la pestaña del perno. Con presión interior post prueba	
	3	0	2	4	5								17	17,07	17,28	18,97										Cedió el perno	
	4	0	2	3									16,77	16,89	21											Soplado violento de la válvula durante el inflado	
4	1	0	2	4	6	8	10	12	14	16	17		17,04	17,04	17,19	17,49	17,99	18,68	19,54	20,75	23,39	26,46				Fisuramiento dentro de la cabeza del perno durante el ensayo	
	2	0	2	4	6	8	10	12	14	16			17	17,05	17,51	18,14	18,68	19,33	20,2	21,67	22,78						
	3	0	2	4	6	8	10	12	14				16,69	16,8	17,09	17,54	18	18,59	19,8	22,53						Baja presión durante el chequeo post prueba	
	4	0	2	4	6	7							16,97	17,01	17,4	18,12	19,45									Falla en la válvula durante inflado, sin presión durante el ensayo.	

### A – 2: MOODELO DE PROCESAMIENTO DE DATOS DE LOS PERNOS HYDRABOLT (DTS = 36 MM)

LEA (pies)	NUM. DE MUESTRA	PRUEBA DE ARRANQUE - CARGA Y DESPLAZAMIENTO																								OBSERVACIONES
		CARGA AJUSTADA SEGÚN CERTIFICACIÓN UNI, Y = 0.9516 X (ton)												DESPLAZAMIENTO (mm)												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	1	0,00	1,90	3,81	5,71	7,61	9,52	10,47						0,00	0,23	0,63	1,12	1,19	1,60							
	2	0,00	1,90	3,81	5,71	7,61							0,00	0,00	0,43	0,79	1,12									
	3	0,00	1,90	3,81	5,71	7,61	9,52						0,00	0,03	0,50											
	4	0,00	1,90	3,81	5,71	7,61							0,00	0,06	0,46	0,89	1,56									
	PROMEDIO	0,00	1,903	3,806	5,71	7,613	9,516						0	0,08	0,505	0,933	1,29	1,6								
2	1	0,00	1,90	3,81	5,71	7,61	9,52	11,42	13,32	15,23	0,00	0,00	0,00	0,03	0,25	1,29	1,93	2,75	4,37							
	2	0,00	1,90	3,81	5,71	7,61	9,52	11,42	13,32				0,00	0,00	0,30	0,70	1,25	2,00	2,96	4,75						
	3	0,00	1,90	3,81									0,00	0,05	0,48											
	4	0,00	1,90	2,85									0,00	0,13	1,70											
	PROMEDIO	0,00	1,903	3,569	5,71	7,613	9,516	11,42	13,32	15,23			0	0,053	0,683	0,995	1,59	2,375	3,665	4,75						
3	1	0,00	1,90	3,81	5,71	7,61	9,52	10,47					0,00	0,04	0,58	1,30	2,11	3,12	4,54							
	2	0,00	1,90	3,81	5,71	7,61	9,52	11,42	13,32	15,23	16,18		0,00	0,06	0,37	0,80	1,22	1,75	2,50	3,56	5,90	5,50				
	3	0,00	1,90	3,81	4,76								0,00	0,07	0,28	1,97										
	4	0,00	1,90	2,85									0,00	0,12	4,23											
	PROMEDIO	0,00	1,903	3,569	5,392	7,613	9,516	10,94	13,32	15,23	16,18		0	0,073	1,365	1,357	1,665	2,435	3,52	3,56	5,9	5,5				
4	1	0,00	1,90	3,81	5,71	7,61	9,52	11,42	13,32	15,23	16,18		0,00	0,00	0,15	0,45	0,95	1,64	2,50	3,71	6,35					
	2	0,00	1,90	3,81	5,71	7,61	9,52	11,42	13,32	15,23			0,00	0,05	0,51	1,14	1,68	2,33	3,20	4,67	5,78					
	3	0,00	1,90	3,81	5,71	7,61	9,52	11,42	13,32				0,00	0,11	0,40	0,85	1,31	1,90								
	4	0,00	1,90	3,81	5,71	6,66							0,00	0,04	0,43	1,15	2,48									
	PROMEDIO	0	1,903	3,806	5,71	7,375	9,516	11,42	13,32	15,23			0	0,05	0,373	0,898	1,605	1,957	2,85	4,19	6,065					

**A – 3: MODELO DE COMPILACION DE DATOS DE LOS PERNOS X-PANDABOLT (DTS = 36 MM)**

LEA (pies)	NUM. DE MUESTRA	PRUEBA DE ARRANQUE - CARGA Y ELONGACION																								OBSERVACIONES	
		TON												DESPLAZAMIENTO (mm)													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
1	1	0	1	2	3	4	5							16,69	16,82	16,86	16,73	16,9	17,9								Escala del manómetro RCH - 202. Ensayo del 06/08/14. Las pruebas se suspendian cuando el perno empezaba a salirse del tubo simulador y la carga descendia. El ensayo se llevó a cabo el 06/08/14
	2	0	1	2	3	4	5	6						17,2	17,32	17,4	17,44	17,53	17,66	18,98							
	3	0	1	2	3	4								17,07	17,08	17,57											
	4	0	1	2	3	4								16,8	16,9	17,52	18,46	19,07									
2	1	0	1	2	3	4	5	6						16,84	17,14	17,8	18,12	18,34	18,4	18,41							
	2	0	1	2	3	4	5	6	6,5					16,9	17,04	17,11	17,3	17,57	17,87	18,2	18,62						
	3	0	1	2	3	4	5	6	6,5					16,89	16,91	17,55	17,89	18,24	18,51	18,84	19,29						
	4	0	1	2	3	4	5	6	7					16,77	16,8	17,45	17,96	18,31	18,63	18,9	19,9						
3	1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	10,5	16,96	16,98	17,51	17,84	18	18,48	18,8	19,19	19,5	19,67	20	21,8		
	2	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9			17,28	17,34	18,16	18,57	18,86	19,14	19,44	19,78	20,22	21,07				
	3	0	1	2	3	4	5	6	7	7,5				16,87	16,93	16,96	17,58	18,03	18,41	18,83	19,27	19,77					
	4	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		17,19	17,2	17,62	18,03	18,39	18,72	19	19,35	19,73	20,17	20,56			
4	1	0	2	4	6	8	10	12	14	14,5				17,29	18,03	18,5	19,1	20,5	20,84	21,61	22,16	24,2					
	2	0	2	4	6	8	10	12	14	14,5				16,88	17,14	17,85	18,36	18,98	19,9	20,85	22,15	22,8					
	3	0	2	4	6	8	10							16,84	17,05	17,64	18,36	19,22	20,3								
	4	0	2	4	6	8	10	12	13					16,4	16,96	17,59	18,23	19,08	20,15	21,22	22,65						

**A – 3: MODELO DE PROCESAMIENTO DE DATOS DE LOS PERNOS X-PANDABOLT (DTS = 36 MM)**

LEA (pies)	NUM. DE MUESTRA	PRUEBA DE ARRANQUE - CARGA Y ELONGACION																								OBSERVACIONES
		CARGA AJUSTADA SEGÚN CERTIFICACIÓN UNI, Y = 0.9516 X (ton)												ELONGACION (mm)												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	1	0	0,95	1,90	2,85	3,81	4,76							0,00	0,13	0,17	0,04	0,21	1,21							
	2	0	0,95	1,90	2,85	3,81	4,76	5,71						0,00	0,12	0,20	0,24	0,33	0,46	1,78						
	3	0	0,95	1,90	2,85	3,81								0,00	0,01	0,50										
	4	0	0,95	1,90	2,85	3,81								0,00	0,10	0,72	1,66	2,27								
	PROMEDIO	0	0,95	1,90	2,85	3,81	4,76	5,71						0,00	0,09	0,40	0,65	0,94	0,83	1,78						
2	1	0	0,95	1,90	2,85	3,81	4,76	5,71						0,00	0,30	0,96	1,28	1,50	1,56	1,57						
	2	0	0,95	1,90	2,85	3,81	4,76	5,71	6,19					0,00	0,14	0,21	0,40	0,67	0,97	1,30	1,72					
	3	0	0,95	1,90	2,85	3,81	4,76	5,71	6,19					0,00	0,02	0,66	1,00	1,35	1,62	1,95	2,40					
	4	0	0,95	1,90	2,85	3,81	4,76	5,71	6,66					0,00	0,03	0,68	1,19	1,54	1,86	2,13	3,13					
	PROMEDIO	0	0,95	1,90	2,85	3,81	4,76	5,71	6,34					0,00	0,12	0,63	0,97	1,27	1,50	1,74	2,42					
3	1	0	0,95	1,90	2,85	3,81	4,76	5,71	6,66	7,61	8,56	9,52	9,99	0,00	0,02	0,55	0,88	1,04	1,52	1,84	2,23	2,54	2,71	3,04	4,84	
	2	0	0,95	1,90	2,85	3,81	4,76	5,71	6,66	7,61	8,56			0,00	0,06	0,88	1,29	1,58	1,86	2,16	2,50	2,94	3,79			
	3	0	0,95	1,90	2,85	3,81	4,76	5,71	6,66	7,14				0,00	0,06	0,09	0,71	1,16	1,54	1,96	2,40	2,90				
	4	0	0,95	1,90	2,85	3,81	4,76	5,71	6,66	7,61	8,56	9,52		0,00	0,01	0,43	0,84	1,20	1,53	1,81	2,16	2,54	2,98	3,37		
	PROMEDIO	0	0,95	1,90	2,85	3,81	4,76	5,71	6,66	7,49	8,56	9,52	9,99	0,00	0,04	0,49	0,93	1,25	1,61	1,94	2,32	2,73	3,16	3,21	4,84	
4	1	0	1,90	3,81	5,71	7,61	9,52	11,42	13,32	13,80				0,00	0,74	1,21	1,81	3,21	3,55	4,32	4,87	6,91				
	2	0	1,90	3,81	5,71	7,61	9,52	11,42	13,32	13,80				0,00	0,26	0,97	1,48	2,10	3,02	3,97	5,27	5,92				
	3	0	1,90	3,81	5,71	7,61	9,52							0,00	0,21	0,80	1,52	2,38	3,46							
	4	0	1,90	3,81	5,71	7,61	9,52	11,42	12,37					0,00	0,56	1,19	1,83	2,68	3,75	4,82	6,25					
	PROMEDIO	0	1,90	3,81	5,71	7,61	9,52	11,42	13,01	13,80				0,00	0,44	1,04	1,66	2,59	3,45	4,37	5,46	6,42				



**A – 4: MODELO DE COMPILACION DE DATOS DE BARRAS HELICOIDALES INSTALADAS CON CARTUCHOS DE CEMENTICIO (DTS = 33 MM)**

LEA (pies)	NUM. DE MUESTRA	CODIGO DE MUESTRA	PRUEBA DE ARRANQUE - CARGA Y ELONGACION																								OBSERVACIONES
			TON												ELONGACION (mm)												
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	1	BHCC - 33 - 1 - 1	0	2	4	6	8	10	12	14	16				27,5	28,08	29,15	30,16	31,29	32,49	33,95	35,59	37,7				Rotura de arandela y deformada y la tuerca de la barra floja. Ensayo del 04/06/15
	2	BHCC - 33 - 1 - 2	0	2	4	6	8	10	12	14	16				27,75	28,1	28,9	29,75	30,52	31,91	30,3	35,19	38,01				No cedió. Se suspendió la prueba por precaución de no dañar la mordaza.
	3	BHCC - 33 - 1 - 3	0	2	4	6	8	10	12	14	16				9,14	9,77	10,59	11,34	12,25	12,9	13,76	14,88	16,57				Se suspendió la prueba por deformación de la arandela.
2	1	BHCC - 33 - 2 - 1	0	2,5	5	7,5	10	12,5	15	17,5	20	21			20,1	21,25	21,64	21,99	22,52	22,93	23,39	23,78	23,79	24,54			11/06/15. El perno cedió
	2	BHCC - 33 - 2 - 2	0	2,5	5	7,5	10	12,5	15	17,5	20	20,5			30,23	30,66	31,07	31,46	31,83	32,21	32,68	33,17	33,96	34,8			11/06/15. El perno cedió
	3	BHCC - 33 - 2 - 3	0	2,5	5	7,5	10	12,5	15	17,5	20	21			29,07	29,49	29,96	30,45	30,92	31,38	31,79	32,22	32,74	33,73			08/06/15. No cedió. Probar nuevamente el 11/06/15, el perno cedió a 21 ton.
3	1	BHCC - 33 - 3 - 1	0	2,5	5	7,5	10	12,5	15	17,5	20	21			19,67	20,35	20,85	21,39	21,95	22,54	23,1	23,66	24,29	24,66			11/06/15. Los pernos cedieron
	2	BHCC - 33 - 3 - 2	0	2,5	5	7,5	10	12,5	15	17,5	20	21			19,71	20,33	20,79	21,27	21,71	22,12	22,63	23,12	23,75	24,55			
	3	BHCC - 33 - 3 - 3	0	2,5	5	7,5	10	12,5	15	17,5	20	21			20,04	21,26	21,78	22,4	22,92	23,4	23,86	24,36	25,03	25,63			
4	1	BHCC - 33 - 4 - 1	0	2,5	5	7,5	10	12,5	15	17,5	20	22			29,99	30,59	30,88	31,29	31,71	32,26	32,5	32,79	33,25	33,39			11/06/15. Los pernos cedieron
	2	BHCC - 33 - 4 - 2	0	2,5	5	7,5	10	12,5	15	17,5	20	21			29,92	30,4	30,81	31,22	31,65	32,1	32,61	33,07	33,66	34,44			
	3	BHCC - 33 - 4 - 3	0	2,5	5	7,5	10	12,5	15	17,5	20	22			19,81	20,13	20,63	21,13	21,69	22,26	22,8	23,38	24,09	25,23			

**A – 4: MODELO DE PROCESAMIENTO DE DATOS DE BARRAS HELICOIDALES INSTALADAS CON CARTUCHOS DE CEMENTICIO (DTS = 33 MM)**

LEA (pies)	NUM. DE MUESTRA	CODIGO DE MUESTRA	PRUEBA DE ARRANQUE - CARGA Y ELONGACION																								OBSERV.
			CARGA AJUSTADA SEGÚN CERTIFICACIÓN UNI, Y = 0.9924 X (ton) y UNCH												ELONGACION (mm)												
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	1	BHCC - 33 - 1 - 1	0	1,98	3,97	5,95	7,94	9,92	11,91	13,89	15,88				0,00	0,58	1,65	2,66	3,79	4,99	6,45	8,09	10,20				
	2	BHCC - 33 - 1 - 2	0	1,98	3,97	5,95	7,94	9,92	11,91	13,89	15,88				0,00	0,35	1,15	2,00	2,77	4,16	2,55	7,44	10,26				
	3	BHCC - 33 - 1 - 3	0	1,98	3,97	5,95	7,94	9,92	11,91	13,89	15,88				0,00	0,63	1,45	2,20	3,11	3,76	4,62	5,74	7,43				
	PROMEDIO		0	1,98	3,97	5,95	7,94	9,92	11,91	13,89	15,88				0,00	0,52	1,42	2,29	3,22	4,30	4,54	7,09	9,30				
2	1	BHCC - 33 - 2 - 1	0	2,50	5,00	7,50	10,00	12,50	15,00	17,50	20,00	21,00			0,00	1,15	1,54	1,89	2,42	2,83	3,29	3,68	3,69	4,44			
	2	BHCC - 33 - 2 - 2	0	2,50	5,00	7,50	10,00	12,50	15,00	17,50	20,00	20,50			0,00	0,43	0,84	1,23	1,60	1,98	2,45	2,94	3,73	4,57			
	3	BHCC - 33 - 2 - 3	0	2,50	5,00	7,50	10,00	12,50	15,00	17,50	20,00	21,00			0,00	0,42	0,89	1,38	1,85	2,31	2,72	3,15	3,67	4,66			
	PROMEDIO		0	2,50	5,00	7,50	10,00	12,50	15,00	17,50	20,00	20,83			0,00	0,67	1,09	1,50	1,96	2,37	2,82	3,26	3,70	4,56			
3	1	BHCC - 33 - 3 - 1	0	2,50	5,00	7,50	10,00	12,50	15,00	17,50	20,00	21,00			0,00	0,68	1,18	1,72	2,28	2,87	3,43	3,99	4,62	4,99			
	2	BHCC - 33 - 3 - 2	0	2,50	5,00	7,50	10,00	12,50	15,00	17,50	20,00	21,00			0,00	0,62	1,08	1,56	2,00	2,41	2,92	3,41	4,04	4,84			
	3	BHCC - 33 - 3 - 3	0	2,50	5,00	7,50	10,00	12,50	15,00	17,50	20,00	21,00			0,00	1,22	1,74	2,36	2,88	3,36	3,82	4,32	4,99	5,59			
	PROMEDIO		0	2,50	5,00	7,50	10,00	12,50	15,00	17,50	20,00	21,00			0,00	0,84	1,33	1,88	2,39	2,88	3,39	3,91	4,55	5,14			
4	1	BHCC - 33 - 4 - 1	0	2,50	5,00	7,50	10,00	12,50	15,00	17,50	20,00	22,00			0,00	0,60	0,89	1,30	1,72	2,27	2,51	2,80	3,26	3,40			
	2	BHCC - 33 - 4 - 2	0	2,50	5,00	7,50	10,00	12,50	15,00	17,50	20,00	21,00			0,00	0,48	0,89	1,30	1,73	2,18	2,69	3,15	3,74	4,52			
	3	BHCC - 33 - 4 - 3	0	2,50	5,00	7,50	10,00	12,50	15,00	17,50	20,00	22,00			0,00	0,32	0,82	1,32	1,88	2,45	2,99	3,57	4,28	5,42			
	PROMEDIO		0	2,50	5,00	7,50	10,00	12,50	15,00	17,50	20,00	21,67			0,00	0,47	0,87	1,31	1,78	2,30	2,73	3,17	3,76	4,45			

**A - 5: MODELO DE COMPILACION DE DATOS DE BARRAS HELICOIDALES INSTALADAS CON CARTUCHOS DE RESINA (DTS = 38 MM)**

[illegible]

**A - 5: MODELO DE PROCESAMIENTO DE DATOS DE BARRAS HELICOIDALES INSTALADAS CON CARTUCHOS DE RESINA (DTS = 38 MM)**

[illegible]

**A – 6: MODELO DE COMPILACION DE DATOS DE BARRAS HELICOIDALES INSTALADAS CON LECHADA DE CEMENTO (DTS = 42 MM)**

LEA (pies)	NUM. DE MUESTRA	CODIGO DE MUESTRA	PRUEBA DE ARRANQUE - CARGA Y DESPLAZAMIENTO																								OBSERVACIONES
			TON												DESPLAZAMIENTO (mm)												
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	1	BHLC - 40 - 1 - 1	0	1	2										18,54	18,58	18,58										05/06/2015. Equipo de NCM, escala RCH 202, lectura en ton. Arandela deformada y falla en la soldadura.
	2	BHLC - 40 - 1 - 2	0	1	2	3	4	5	6						18,8	18,88	18,94	19,05	19,34	19,68	19,96						
	3	BHLC - 40 - 1 - 3	0	1	2	3									18,62	18,62	18,62	18,7									
2	1	BHLC - 40 - 2 - 1	0	2	4	6	8	10	12	14					19,06	19,06	21,8	24,8	27,67	31,3	36,35	45,56				06/06/15. El perno cedió. Equipo NCM, Arandela deformada y falla en la soldadura.	
	2	BHLC - 40 - 2 - 2	0	2	4	6	8							18,81	18,95	20,05	22,75	24,76									
	3	BHLC - 40 - 2 - 3	0	2	4	6								18,93	19,07	19,71	20,06										
3	1	BHLC - 40 - 3 - 1	0	2	4	6	8	10	12	14	16	17			18,86	19,02	19,5	19,95	20,45	20,94	21,45	21,98	22,8	23,89		06/06/15. El perno cedió. Equipo NCM, Arandela deformada y falla en la soldadura.	
	2	BHLC - 40 - 3 - 2	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18			18,95	18,95	19,33	19,74	20,25	20,69	21,22	21,8	22,56	23,92			
	3	BHLC - 40 - 3 - 3	0	2	4	5								18,87	18,9	20,09	22,28										
4	1	BHLC - 40 - 4 - 1	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20		18,74	19,02	19,59	20,16	20,72	21,23	21,9	22,6	23,32	24,4	25,62	08/06/15. El perno cedió. Equipo NCM, Arandela deformada y falla en la soldadura.	
	2	BHLC - 40 - 4 - 2	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	18,79	19,08	19,59	19,99	20,45	20,85	21,26	21,66	22,5	22,56	23,29		24,18
	3	BHLC - 40 - 4 - 3	0	2	4	6	8	10	11						18,84	19,32	20,05	20,6	21,18	21,76	22,37						

**A – 6: MODELO DE PROCESAMIENTO DE DATOS DE BARRAS HELICOIDALES INSTALADAS CON LECHADA DE CEMENTO (DTS = 42 MM)**

A (pies)	NUM. DE MUESTRA	CODIGO DE MUESTRA	PRUEBA DE ARRANQUE - CARGA Y DESPLAZAMIENTO																								OBSERVACIONES
			CARGA AJUSTADA SEGÚN CERTIFICACIÓN UNI, Y = 0.9924 X (ton)												DESPLAZAMIENTO (mm)												
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	1	BHLC - 40 - 1 - 1	0	0,99	1,98										0	0,04	0,04										
	2	BHLC - 40 - 1 - 2	0	0,99	1,98	2,98	3,97	4,96	5,95						0	0,08	0,14	0,25	0,54	0,88	1,16						
	3	BHLC - 40 - 1 - 3	0	0,99	1,98	2,98									0	0,00	0,00	0,08									
	PROMEDIO		0	0,99	1,98	2,98									0	0,04	0,06	0,16									
2	1	BHLC - 40 - 2 - 1	0	1,98	3,97	5,95	7,94	9,92	11,91	13,89					0	0,00	2,74	5,74	8,61	12,24	17,29	26,50					
	2	BHLC - 40 - 2 - 2	0	1,98	3,97	5,95	7,94								0	0,14	1,24	3,94	5,95								
	3	BHLC - 40 - 2 - 3	0	1,98	3,97	5,95									0	0,14	0,78	1,13									
	PROMEDIO		0	1,98	3,97	5,95	7,94	9,92	11,91						0	0,09	1,59	3,60	7,28	12,24	17,29						
3	1	BHLC - 40 - 3 - 1	0	1,98	3,97	5,95	7,94	9,92	11,91	13,89	15,88	16,87			0	0,16	0,64	1,09	1,59	2,08	2,59	3,12	3,94	5,03			
	2	BHLC - 40 - 3 - 2	0	1,98	3,97	5,95	7,94	9,92	11,91	13,89	15,88	17,86			0	0,00	0,38	0,79	1,30	1,74	2,27	2,85	3,61	4,97			
	3	BHLC - 40 - 3 - 3	0	1,98	3,97	4,96									0	0,03	1,22	3,41									
	PROMEDIO		0	1,98	3,97	5,62	7,94	9,92	11,91	13,89	15,88	17,37			0	0,06	0,75	1,76	1,45	1,91	2,43	2,99	3,78	5,00			
4	1	BHLC - 40 - 4 - 1	0	1,98	3,97	5,95	7,94	9,92	11,91	13,89	15,88	17,86	19,85		0	0,28	0,85	1,42	1,98	2,49	3,16	3,86	4,58	5,66	6,88		
	2	BHLC - 40 - 4 - 2	0	1,98	3,97	5,95	7,94	9,92	11,91	13,89	15,88	17,86	19,85	21,83	0	0,29	0,80	1,20	1,66	2,06	2,47	2,87	3,71	3,77	4,50	5,39	
	3	BHLC - 40 - 4 - 3	0	1,98	3,97	5,95	7,94	9,92	10,92						0	0,48	1,21	1,76	2,34	2,92	3,53						
	PROMEDIO		0	1,98	3,97	5,95	7,94	9,92	11,58	13,89	15,88	17,86	19,85		0	0,35	0,95	1,46	1,99	2,49	3,05	3,37	4,15	4,72	5,69		

## ANEXO B

### CALIBRACION DE LOS EQUIPOS DE ARRANQUE POR LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA Y LA UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

Facultad de Ingeniería Civil

LABORATORIO N° 1 ENSAYO DE MATERIALES "ING. MANUEL GONZÁLES DE LA COTERA"

Página 1 de 2

#### INFORME

Del : Laboratorio N°1 Ensayo de Materiales  
A : NEW CONCEPT MINING PERU SAC.  
Obra : CALIBRACIÓN DE UNA GATA HIDRAÚLICA  
Asunto : Calibración de EQUIPO PULL TEST.  
Expediente N° : 15-0628  
Recibo N° : 33168  
Fecha de emisión : 20/03/2015

1.0. DEL EQUIPO EQUIPO PULL TEST.

2.0. PROCEDIMIENTO : Alcance de las normas ASTM E4; Norma ISO 7500-1  
Equipo TINIUS OLSEN - Certificado de Calibración SNM: CMC 084 2014.

3.0. EQUIPO A CALIBRAR : EQUIPO EQUIPO PULL TEST.

ACCESORIO 1 MANÓMETRO  
MARCA ENERPAC  
CAPACIDAD 20 TN.  
MODEL GF 813 P  
ESCALA RCH-202

ACCESORIO 2 PISTÓN HIDRAÚLICO  
MARCA POWER TEAM  
CAPACIDAD 20 TN

ACCESORIO 3 GATA HIDRAULICA  
MARCA POWER TEAM  
SERIE EPT60625  
CAPACIDAD 20 TN

4.0. RESULTADOS

Fecha de calibración: 19/03/2015

LECTURA DEL MANÓMETRO	CARGA PATRON
TN.	TN.
0	0.00
2	1.95
4	3.93
6	5.93
8	7.93
10	9.92
12	11.93
14	13.90
16	15.88



Ms. Ing. Ana Torre Carrillo  
Jefe del laboratorio

#### NOTAS

- 1) Está prohibido reproducir o modificar el informe de ensayo, total o parcialmente, sin la autorización del laboratorio.
- 2) Los resultados de los ensayos solo corresponden a las muestras proporcionadas por el solicitante.



Av. Túpac Amaru N. 210, Lima 25, Apartado 1301 - Perú  
Teléfono: (511) 381-3343 Central Telefónica: (511) 481-1070 Anexo: 306  
www.lem.uni.edu.pe / lem@uni.edu.pe





# UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

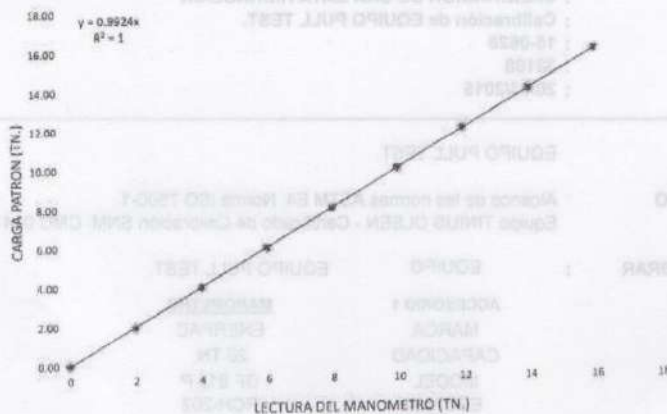
## Facultad de Ingeniería Civil

LABORATORIO N° 1 ENSAYO DE MATERIALES "ING. MANUEL GONZÁLES DE LA COTERA"

Página 2 de 2

EXPEDIENTE : 15-0628

### GRÁFICO DE CALIBRACIÓN DE EQUIPO PULL TEST.

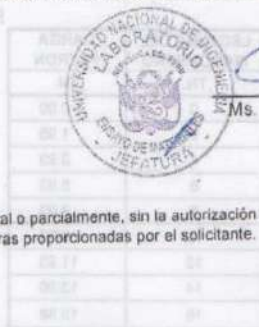


Donde:  $Y = 0.9924 X$   
 $y$  = Carga Patrón (TN.)  
 $x$  = Lectura del Manómetro (TN.)

### 5.0. OBSERVACIONES :

- 1) El equipo fue proporcionado e identificado por el solicitante.
- 2) El ajuste lineal es válido en el rango verificado y su empleo es opcional.
- 3) Los resultados son válidos en el momento de la calibración. Al solicitante le corresponde disponer en su momento la ejecución de una recalibración, la cual está en función del uso, conservación y mantenimiento del equipo o a reglamentaciones vigentes.

Hecho por : Lic. J. Basurto P.  
 Técnico : V.G.R.



Ms. Ing. Ana Torre Carrillo  
 Jefe del laboratorio

### NOTAS:


- 1) Está prohibido reproducir o modificar el informe de ensayo, total o parcialmente, sin la autorización del laboratorio.
- 2) Los resultados de los ensayos solo corresponden a las muestras proporcionadas por el solicitante.



Av. Túpac Amaru N. 210, Lima 25, Apartado 1301 - Perú  
 Telefax: (511) 381-3343 Central Telefónica: (511) 481-1070 Anexo: 306  
[www.lem.uniledupe](http://www.lem.uniledupe) / [lem@uniledupe](mailto:lem@uniledupe)





	INFORME DE RESULTADOS	Fecha: 24 de Octubre de 2014
	AM-7194-0101	Revisión: 00.-
	MINOVA	Página 1 de 5



Cliente	: MINOVA MINING SERVICES S.A.	
Dirección	: Av. Lo Echevers # 300, Quilicura, Santiago.	
Tipo de Muestra	: Gata hidráulica.	
Cantidad	: 01.	
Tipo de Ensayo	: Calibración.	Fecha de Recepción : 22-10-14
Solicitante	: Sr. José Luis La Rosa.	Fecha Emisión Informe : 24-10-14

#### A.- Identificación de la Muestra:

ID ITEM	Identificación del cliente
7194-01	Un equipo hidráulico manual y un cilindro amarillo , identificados como: <b>"Equipo hidráulico; Power Team SPX; Con cilindro Amarillo; PART NO. P159D, MODEL C, 10000 PDI / 700 BAR; SERIA NO. 0805AT 177701"</b> .

En la figura A.1 se presenta una imagen de los equipos recibidos.




Figura A.1 Imagen de los equipos recibido.



UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE  
Departamento de Ingeniería Metalúrgica  
Laboratorio de Ensayos e Investigación de Materiales SIMET-USACH  
Av. Ecuador 3769, Estación Central-Santiago-Chile  
Fono-Fax: 56-2-23234780, Email: [simet@usach.cl](mailto:simet@usach.cl)  
[www.simet.cl](http://www.simet.cl)



	INFORME DE RESULTADOS	Fecha: 24 de Octubre de 2014
	AM-7194-0101	Revisión: 00.-
	MINOVA	Página 2 de 5



#### **B.- Evaluación de Cargas:**

El cilindro fue montado en la máquina de tracción, el cual ejerció presión sobre ésta. Tal presión fue medida por el manómetro incorporado y comparada con la carga que ejerció la máquina de tracción. En la figura B.1 se aprecia el manómetro evaluado, la flecha amarilla indica la escala del manómetro que fue evaluada (psi, escala azul).

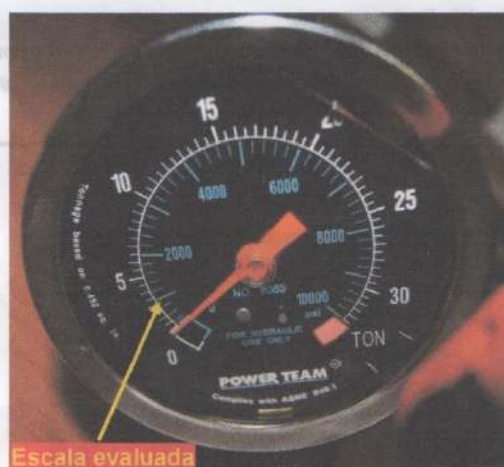


Figura B.1 Escala evaluada.

En la figura B.2 se aprecia una imagen del montaje utilizado en el ensayo de equipo recibido.




	INFORME DE RESULTADOS	Fecha: 24 de Octubre de 2014
	AM-7194-0101	Revisión: 00.-
	MINOVA	Página 3 de 5



Figura B.2 Montaje del ensayo.

Los valores evaluados para el desarrollo de este trabajo varían entre 0 y 9.000 psi, evaluando las cargas cada 1.000 psi.

A través de una regresión lineal, se obtienen las formulas (1) y (2)  
De psi a kg (fuerza).


$$kg \text{ (fuerza)} = 2,9717 \cdot (psi) - 947,95 \quad (1)$$

Y de psi a ton (fuerza).

$$ton \text{ (fuerza)} = 0,0029717 \cdot (psi) - 0,94795 \quad (2)$$

Donde psi es el valor entregado por el manómetro (escala azul) y cada subdivisión equivale a 200 psi.



	INFORME DE RESULTADOS	Fecha: 24 de Octubre de 2014
	AM-7194-0101	Revisión: 00.-
	MINOVA	Página 4 de 5

La figura B.3 muestra el gráfico obtenido a partir de los datos de evaluación.

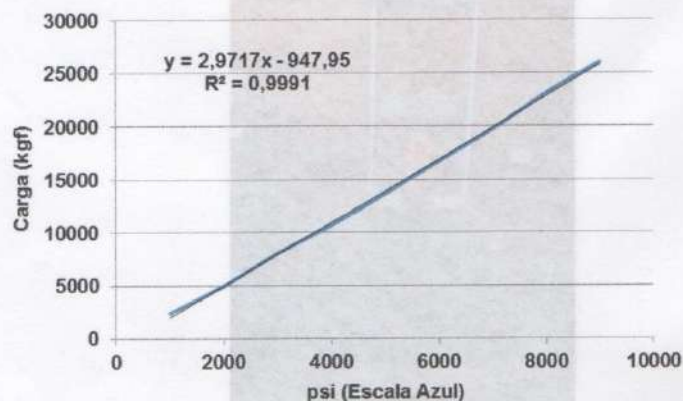



Figura B.3 Regresión lineal kg (fuerza) v/s psi.

En la tabla B.1 se presenta una tabla comparativa de evaluación de cargas.

Tabla B.1 Evaluación entre psi y ton.

Escala [psi]	Escala [ton]
1.000	2,02
2.000	5,00
3.000	7,97
4.000	10,94
5.000	13,91
6.000	16,88
7.000	19,85
8.000	22,83
9.000	25,80

	<b>INFORME DE RESULTADOS</b> AM-7194-0101 MINOVA	Fecha: 24 de Octubre de 2014
		Revisión: 00.-
		Página 5 de 5



#### C.- Observaciones:

Con fecha 24 de Octubre de 2014, el equipo identificado como **"Equipo hidraulico; Power Team SPX; Con cilindro Amarillo; PART NO. P159D, MODEL C, 10000 PDI / 700 BAR; SERIA NO. 0805AT 177701"**, presenta una correlación entre el manómetro (psi) y la carga ejercida por el equipo de tracción (ton), presentada en la tabla B.1.

#### NOTAS:

- Los resultados obtenidos son válidos sólo para las muestras ensayadas y entregadas por el cliente.
- Este informe no puede ser reproducido parcial ni totalmente sin la aprobación escrita del laboratorio.
- El laboratorio SIMET-USACH no se responsabiliza por las muestras ensayadas a contar de 30 días de la fecha de emisión de informe.
- Los ensayos de tracción fueron realizados en una máquina de tracción marca Tinius & Olsen Mod. Súper L, con capacidad para 30 toneladas (certificado de calibración IDIC N° F-961, con fecha 05 de Diciembre de 2012).



Ing. Héctor Bruna R.  
Ingeniero de Procesos  
Laboratorio SIMET-USACH





Ing. César Segovia C.  
Sub Gerente Técnico.  
Laboratorio SIMET-USACH

Verificación de este documento en [www.simet.cl/verificacioninforme.php](http://www.simet.cl/verificacioninforme.php)

Código de Verificación: LLSQVPYGH3W



UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE  
 Departamento de Ingeniería Metalúrgica  
 Laboratorio de Ensayos e Investigación de Materiales SIMET-USACH  
 Av. Ecuador 3769, Estación Central-Santiago-Chile  
 Fono-Fax: 56-2-23234780, Email: [simet@usach.cl](mailto:simet@usach.cl)  
[www.simet.cl](http://www.simet.cl)



## ANEXO C

### ANALISIS DE LOS PERFILES DE CONTACTO LOS PERNOS DE CONSTRICCION E IFLABLES CON LAS PAREDES DE LOS TUBOS SIMULADORES

#### C – 1: MODELOS DE PERFILES DE CONTACTOS DE LOS SPLIT SETS (DTS = 37,3 MM)

NUMERO DE SECCIÓN DE LA MUESTRA (PERNO)	LONGITUD DE LA SECCIÓN (mm)	NUMERO DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO O PLEGUE	ANCHO DE LA CUERDA DE CONTACTO O RANURA (mm)		LONGITUD DEL ARCO DE CONTACTO O RANURA (mm)		SUPERFICIE DE CONTACTO O ABERTURA DE LA RANURA (mm2)		Superficie máximo del Split Set que haría contacto (mm2)	SUPERFICIE DE CONTACTO PORCENTUAL O ABERTURA DE LA RANURA (%)
			Hacia la cabeza (a1)	Hacia la cola (a2)	Hacia la cabeza (Lc1)	Hacia la cola (Lc2)	PARCIAL	TOTAL		
SECCION 0	180	Contacto 1	3,01	3,01	3,01	3,01	542,39	9061,04	19567,02	46,31
	180	Contacto 2	12,43	12,43	12,67	12,67	2281,03			
	180	Contacto 3	19,82	19,82	20,90	20,90	3761,28			
	180	Contacto 4	10,5	10,5	10,64	10,64	1915,90			
	180	Contacto 5	3,11	3,11	3,11	3,11	560,45			
	180	Abertura debido a la ranura	9,41	9,41	9,51	9,51	1712,30	1712,30	19567,02	8,75
SECCION 1	250	Contacto 1	2,88	2,88	2,88	2,88	720,72	12154,79	27176,41	44,73
	250	Contacto 2	14,65	14,65	15,06	15,06	3763,87			
	250	Contacto 3	17,2	17,2	17,88	17,88	4469,13			
	250	Contacto 4	10,48	10,48	10,62	10,62	2655,76			
	250	Contacto 5	2,18	2,18	2,18	2,18	545,31			
	250	Abertura debido a la ranura	10,43	10,43	10,57	10,57	2642,73	2642,73	27176,41	9,72
SECCION 2	251	Contacto 1	2,68	2,68	2,68	2,68	673,26	12541,44	27285,12	45,96
	251	Contacto 2	15,48	15,48	15,96	15,96	4006,67			
	251	Contacto 3	17,46	17,46	18,17	18,17	4560,71			
	251	Contacto 4	10,62	10,62	10,77	10,77	2703,02			
	251	Contacto 5	2,38	2,38	2,38	2,38	597,79			
	251	Abertura debido a la ranura	10,25	10,25	10,38	10,38	2606,28	2606,28	27285,12	9,55
SECCION 3	254	Contacto 1	1,7	1,7	1,70	1,70	431,95	11937,73	27611,23	43,24
	254	Contacto 2	18,78	18,78	19,68	19,68	4998,85			
	254	Contacto 3	13,39	13,39	13,70	13,70	3478,70			
	254	Contacto 4	8,6	8,6	8,68	8,68	2204,23			
	254	Contacto 5	3,24	3,24	3,24	3,24	824,00			
	254	Abertura debido a la ranura	10,25	10,25	10,38	10,38	2637,43	2637,43	27611,23	9,55
SECCION 4	249	Contacto 1	2,6	2,6	2,60	2,60	647,93	8766,52	27067,7	46,33
	249	Contacto 2	6,76	6,76	6,80	6,80	1692,59			
	249	Contacto 3	16,62	16,62	17,23	17,23	4289,23			
	249	Contacto 4	5,18	5,18	5,20	5,20	1294,00			
	249	Contacto 5	3,38	3,38	3,38	3,38	842,78			
	249	Abertura debido a la ranura	9,95	9,95	10,07	10,07	2507,92	2507,92	27067,71	9,27

**C – 2: MODELOS DE LOS PERFILES DE CONTACTOS DE LOS PERNOS HYDRABOLT (DTS = 32,5 MM)**

NUMERO DE SECCIÓN DE LA MUESTRA (PERNO)	LONGITUD DE LA SECCIÓN (mm)	NUMERO DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO O PLIEGUE	ANCHO DE LA CUERDA DE CONTACTO O PLIEGUE (mm)		LONGITUD DEL ARCO DE CONTACTO O PLIEGUE (mm)		SUPERFICIE DE CONTACTO O ABERTURA DEL PLIEGUE (mm2)		Superficie de la pared interior del tubo simulador (mm2)	Superficie de la porción de perno si se inflara al aire libre (mm2)	SUPERFICIE DE CONTACTO PORCENTUAL O ABERTURA DEL PLIEGUE (%)	
			Hacia la cabeza (a1)	Hacia la cola (a2)	Hacia la cabeza (Lc1)	Hacia la cola (Lc2)	PARCIAL	TOTAL			Respecto al tubo simulador	Respecto al mismo perno
SECCION 1	101	Contacto 1	9,86	9,86	10,02	10,02	1011,81	6634,12	10312,30	13555,12	64,33	48,94
	101	Contacto 2	31,74	31,74	58,09	44,01	5156,15					
	101	Contacto 3	4,6	4,6	4,62	4,62	466,17					
	101	Abertura debido al pliegue	15,41	15,41	16,06	16,06	1621,56	1621,56			15,72	11,96
SECCIÓN 2	293	Contacto 1	9,86	8,59	10,02	8,69	2741,19	20050,66	29915,886	39323,28	67,02	50,99
	293	Contacto 2	31,74	32,5	58,09	51,05	15989,67					
	293	Contacto 3	4,6	4,38	4,62	4,39	1319,80					
	293	Abertura debido al pliegue	15,41	15,41	16,06	16,06	4704,14	4704,14	29915,886	39323,28	15,72	11,96
SECCIÓN 3	298	Contacto 1	9,85	8,97	10,01	9,09	2845,21	18180,90	30426,396	39994,33	59,75	45,46
	298	Contacto 2	32,17	32,22	46,42	46,78	13886,38					
	298	Contacto 3	4,47	5,22	4,48	5,24	1449,31					
	298	Abertura debido al pliegue	15,74	16,23	16,43	16,99	4980,32	4980,32			16,37	12,45
SECCION 4	296	Contacto 1	8,46	10,71	8,56	10,91	2881,94	18059,18	30222,19	39725,91	59,75	45,46
	296	Contacto 2	32,05	32,28	45,64	47,27	13749,72					
	296	Contacto 3	4,68	4,93	4,70	4,95	1427,52					
	296	Abertura debido al pliegue	16,26	15,61	17,03	16,28	4930,06	4930,06	30222,19	39725,91	16,31	12,41
SECCION 5	223	Contacto 1	6,42	6,42	6,46	6,46	1441,14	13010,07	22768,75	29928,64	57,14	43,47
	223	Contacto 2	32,23	32,23	46,86	46,86	10449,49					
	223	Contacto 3	5	5	5,02	5,02	1119,45					
	223	Abertura debido al pliegue	16,17	16,17	16,92	16,92	3774,20	3774,20	22768,75	29928,64	16,58	12,61

PROMEDIO DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO (%) 46,86  
PROMEDIO DE LA SUPERFICIE SIN CONTACTO DEBIDO AL PLIEGUE (%) 12,28  
PROMEDIO DE SUPERFICIE SIN CONTACTO POR ABERTURAS (%) 40,86  
SUPERFICIE TOTAL SIN CONTACTO (%) 53,14

**C - 3: MODELOS DE PERFILES DE CONTACTOS DE LOS PERNOS X-PANDABOLT (DTS = 36,56 MM)**

DIAMETRO DEL PERNO INFLADO AL AIRE LIBRE (mm)

41,66

DIAMETRO INTERIOR DEL TUBO SIMULADOR (mm)

36,56

NUMERO DE SECCIÓN DE LA MUESTRA (PERNO)	LONGITUD DE LA SECCIÓN (mm)	NUMERO DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO O PLIEGUE	ANCHO DE LA CUERDA DE CONTACTO O PLIEGUE (mm)		LONGITUD DEL ARCO DE CONTACTO O PLIEGUE (mm)		SUPERFICIE DE CONTACTO O ABERTURA DEL PLIEGUE (mm <sup>2</sup> )		Superficie de la pared interior del tubo simulador (mm <sup>2</sup> )	Superficie de la porción de perno si se inflara al aire libre (mm <sup>2</sup> )	SUPERFICIE DE CONTACTO PORCENTUAL O ABERTURA DEL PLIEGUE (%)	
			Hacia la cabeza (a1)	Hacia la cola (a2)	Hacia la cabeza (Lc1)	Hacia la cola (LC2)	PARCIAL	TOTAL			Respecto al tubo simulador	Respecto al mismo perno
SECCION 1	50,72	Contacto	0	0	0	0	0	0	5825,541765	6638,18572	0	0
SECCION 2	296	Contacto 1	8,17	8,17	8,24	8,24	2438,91	17852,39	33997,64	38740,20	52,51	46,08
	296	Contacto 2	34,05	34,05	43,80	43,80	12965,46					
	296	Contacto 3	8,2	8,2	8,27	8,27	2448,03					
	296	Abertura debido al pliegue	18,73	18,73	19,66	19,66	5820,71	5820,71			17,12	15,02
SECCION 3	293	Contacto 1	9,56	9,56	9,67	9,67	2834,03	21348,31	33653,07053	38347,56	63,44	55,67
	293	Contacto 2	35,17	35,17	47,31	47,31	13863,17					
	293	Contacto 3	15,38	15,38	15,87	15,87	4651,11					
	292	Abertura debido al pliegue	18,38	18,38	19,26	19,26	5623,44	5623,44	33538,21363	38216,68	16,71	14,66
SECCION 4	299	Contacto 1	8,2	6,39	8,27	6,42	1534,88	16677,43	34342,21	39132,84	48,56	42,62
	299	Contacto 2	32,21	32,23	39,41	39,45	11128,73					
	299	Contacto 3	15,12	15,21	15,59	15,69	4013,82					
	297	Abertura debido al pliegue	17,01	18,22	17,69	19,07	5459,76	5459,76	34112,50	38871,08	15,90	13,95
SECCION 5	2,42	Contacto 1	7,7	7,7	7,76	7,76	18,77	142,98	277,95	316,73	51,44	45,14
	2,42	Contacto 2	34,16	34,16	44,11	44,11	106,74					
	2,42	Contacto 3	7,17	7,17	7,22	7,22	17,46					
	242	Abertura debido al pliegue	24,86	24,86	27,34	27,34	6615,58	6615,58	27795,37	31672,73	23,80	20,89

PROMEDIO DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO (%) 47,81

PROMEDIO DE LA SUPERFICIE SIN CONTACTO DEBIDO AL PLIEGUE (%) 16,13

PEMEDIO DE SUPERFICIE SIN CONTACTO POR ABERTURAS (%) 36,06

SUPERFICIE TOTAL SIN CONTACTO (%) 52,19



## ANEXO D

### PROPIEDADES DE LOS MORTEROS FRAGUADOS DE LAS BARRAS HELICOIDALES

#### D-1: ANALISIS DE LAS CARACTERISITICAS MACROSCOPICAS DE LA BARRA HELICOIDAL INSTALADA CON CARTUCHOS DE CEMENTICIO

MUESTRA	CARACTERISTICAS MACROCÓPICAS	SECCIONES						OBSERVACIONES
		0	1	2	3	4	5	
BHCC-33-4-1	Posición de la barra	Descentrado	Muy Descentrado	descentrado		Sección utilizada para preparar probetas	Muy descentrado, barra pegado a la pared del tubo	
	Porosidad	10 burbujas de 0,5 á 4,5 mm, se observa bastante poroso	7 burbujas de 0,5 á 2 mm,	4 burbujas de 1,8 á 6 mm			16 burbujas de 0,6 á 2.27 mm	
	Acoplamiento	Bueno tanto en la barra como en la pared del tubo	Bueno, pero con presencia de envoltorio plástico	bueno			Bueno	
	Aspereza/rugosidad	Áspero al tacto	Áspero al tacto	Áspero al tacto			Áspero al tacto	
	Presencia del envoltorio plástico	No notable	Se nota a un lado de la barra cubriendo la mitad de la pared del tubo	Envoltorio a la vista, pegado a la pared del tubo, reduciendo el acoplamiento.			No	Envoltorio de plástico de 0,06 mm de espesor. Es una manga que plegado tiene un ancho de 44,79 mm y desplegado 89,58 mm. Configura una manga de 28,52 mm de diámetro
	Dureza	Los cristales de calcita y fluorita no lo rayan, pero sí la cuchilla (dureza 5,5).	Los cristales de calcita y fluorita no lo rayan, pero sí la cuchilla (dureza 5,5).	Los cristales de calcita y fluorita no lo rayan, pero sí la cuchilla (dureza 5,5).	Los cristales de calcita y fluorita no lo rayan, pero sí la cuchilla (dureza 5,5).		Los cristales de calcita y fluorita no lo rayan, pero sí la cuchilla (dureza 5,5).	
	Observaciones			En el otro extremo, no se nota presencia del envoltorio			En el otro extremo se observa envoltorio plástico en todo el contacto con el tubo.	
BHCC-36-4-1	Posición de la barra	Descentrado	Ligeramente descentrado	descentrado	Ligeramente descentrado		Ligeramente descentrado	
	Porosidad	7 burbujas de 0,76 á 4 mm	2 burbujas de 4 mm	2 burbujas de 1,67 mm	2 burbujas de 0,6 mm y 2 de 2,5 mm		3 burbujas de 1 á 2 mm	
	Acoplamiento	Bueno tanto en la barra como en la pared del tubo	Bueno	bueno	bueno		Bueno	
	Aspereza/rugosidad	Áspero al tacto	Áspero al tacto	Áspero al tacto	Áspero al tacto		Áspero al tacto	
	Presencia del envoltorio plástico	No notable	No se nota	No se nota	Se nota completamente plegado		no se nota	Envoltorio de plástico de 0,06 mm de espesor. Es una manga de plástico que plegado tiene un ancho de 44,79 mm y desplegado 89,58 mm. Configura una manga de 28,52 mm de diámetro

	Dureza	Los cristales de calcita y fluorita no lo rayan, pero si la cuchilla (dureza 5,5).	Los cristales de calcita y fluorita no lo rayan, pero si la cuchilla (dureza 5,5).	Los cristales de calcita y fluorita no lo rayan, pero si la cuchilla (dureza 5,5).	Los cristales de calcita y fluorita no lo rayan, pero si la cuchilla (dureza 5,5).		Los cristales de calcita y fluorita no lo rayan, pero si la cuchilla (dureza 5,5).	
	Observaciones				Parte del envoltorio plástico está en contacto con la barra.			
<b>BHCC-38-4-3</b>	Posición de la barra	Descentrado	Descentrado	Ligeramente descentrado	muy descentrado		Ligeramente descentrado	
	Porosidad	9 burbujas de 0,5 á 1,14 mm	15 burbujas de 0,4 á 4 mm	25 burbujas de 0,19 á 2,5 mm	10 burbujas de 0,2 á 0,92 mm.		12 burbujas de 0,5 á 1,0 mm	
	Acoplamiento	Bueno tanto en la barra como en la pared del tubo	Bueno	bueno	bueno		Bueno	
	Aspereza/rugosidad	Áspero al tacto	Áspero al taco, por los granos de la arena.	Áspero al taco, por los granos de la arena.	Áspero al taco, por los granos de la arena.		Áspero al tacto	
	Presencia del envoltorio plástico	No se nota	No se nota	No se nota	No se nota		no se nota	Envoltorio de plástico de 0,06 mm de espesor. Es una manga de plástico que plegado tiene un ancho de 44,79 mm y desplegado 89,58 mm. Configura una manga de 28,52 mm de diámetro
	Dureza	Los cristales de calcita y fluorita no lo rayan, pero si la cuchilla (dureza 5,5).	Los cristales de calcita y fluorita no lo rayan, pero si la cuchilla (dureza 5,5).	Los cristales de calcita y fluorita no lo rayan, pero si la cuchilla (dureza 5,5).	Los cristales de calcita y fluorita no lo rayan, pero si la cuchilla (dureza 5,5).		Los cristales de calcita y fluorita no lo rayan, pero si la cuchilla (dureza 5,5).	
	Observaciones							
<b>BHCC-40-4-3</b>	Posición de la barra	Descentrado	Ligeramente descentrado	Ligeramente descentrado	Ligeramente descentrado	Ligeramente descentrado	Ligeramente descentrado	
	Porosidad	10 burbujas de 0,5 á 2 mm, se observa bastante poroso	16 burbujas de 1 a 2 mm	12 burbujas de 0,5 á 2 mm	4 burbujas de 0,6 á 4 mm	10 burbujas de 0,5 á 2 mm y 1 oquedad 2,8 x 13,3 x 4,7 mm	3 burbujas de 0,5 á 1 mm	
	Acoplamiento	Bueno tanto en la barra como en la pared del tubo	Bueno tanto en la barra como en la pared del tubo	Bueno tanto en la barra como en la pared del tubo	Bueno tanto en la barra como en la pared del tubo	Bueno tanto en la barra como en la pared del tubo	Bueno tanto en la barra como en la pared del tubo	
	Aspereza/rugosidad	Áspero al tacto	Áspero al tacto	Áspero al tacto	Áspero al tacto	Áspero al tacto	Áspero al tacto	
	Presencia del envoltorio plástico	Completamente plegado	Completamente plegado hacia un lado	Se observa en distintas partes del cementicio	Se observa alrededor de la barra completamente plegada.	Completamente plegado alrededor de la barra	Completamiento plegado a un lado del tubo	Envoltorio de plástico de 0,06 mm de espesor. Es una manga de plástico que plegado tiene un ancho de 44,79 mm y desplegado 89,58 mm. Configura una manga de 28,52 mm de diámetro
	Dureza	Los cristales de calcita y fluorita no lo rayan, pero si la cuchilla (dureza 5,5).	Los cristales de calcita y fluorita no lo rayan, pero si la cuchilla (dureza 5,5).	Los cristales de calcita y fluorita no lo rayan, pero si la cuchilla (dureza 5,5).	Los cristales de calcita y fluorita no lo rayan, pero si la cuchilla (dureza 5,5).	Los cristales de calcita y fluorita no lo rayan, pero si la cuchilla (dureza 5,5).		
	Observaciones							

Posición de la barra respecto al eje del budo

- 1) CENTRADO: Cuando el perno se presenta centrado en el eje del tubo.
- 2) LIGERAMENTE DESCENTRADO: Cuando la barra se presenta posicionado cerca al eje del tubo.
- 3) DESCENTRADO: La barra se presenta cerca a la pared del tubo.

4) MUY DESCENTRADO: La barra se presenta muy cerca o pegado a la pared del tubo.

## D-2: ANALISIS DE LAS CARACTERISITICAS MACROSCOPICAS DE LA BARRA HELICOIDAL INSTALADA CON CARTUCHOS DE RESINA

MUESTRA	CARACTERISTICAS MACROCÓPICAS	SECCIONES						OBSERVACIONES
		0	1	2	3	4	5	
BHCR - 33 - 3 - 1	Posición de la barra	Muy descentrado	Muy Descentrado	descentrado	Sección utilizada para preparar probetas	Muy descentrado, barra pegado a la pared del tubo		
	Porosidad	Se notan 10 poros pequeños	7 burbujas de 0,5 á 2 mm,	4 burbujas de 1,8 á 6 mm		16 burbujas de 0,6 á 2.27 mm		
	Acoplamiento	Bueno tanto en la barra como en la pared del tubo	Bueno, pero con presencia de envoltorio plástico	bueno		Bueno		Envoltorio de plástico de 0,04 mm de espesor. Es una manga de plástico que desplegado tiene un ancho de 84,87 mm.
	Aspereza/rugosidad	Liso al tacto	Liso al tacto	Liso al tacto		Liso al tacto		Configura una manga de 27,015 mm de diámetro, con un diafragma en su interior que separa los componentes "A" y "B" de la resina.
	Presencia del envoltorio plástico	No apreciable	Se nota a un lado de la barra cubriendo la mitad de la pared del tubo	Envoltorio a la vista, pegado a la pared del tubo, reduciendo el acoplamiento.		No		
	Dureza	Los cristales de calcita y fluorita no lo rayan, pero la cuchilla con facilidad (dureza 5).	Los cristales de calcita y fluorita no lo rayan, pero la cuchilla con facilidad (dureza 5).	Los cristales de calcita y fluorita no lo rayan, pero la cuchilla con facilidad (dureza 5).		Los cristales de calcita y fluorita no lo rayan, pero la cuchilla con facilidad (dureza 5).		Se nota más suave que el cementicio
	Observaciones							
BHCR - 36 - 3 - 1	Posición de la barra	Descentrado	Ligeramente descentrado	Ligeramente descentrado		Descentrado		
	Porosidad	7 burbujas de 0,76 á 4 mm	2 burbujas de 4 mm	2 burbujas de 1,67 mm		Un conjunto de pequeñas burbujas		
	Acoplamiento	Bueno tanto en la barra como en la pared del tubo	Bueno	bueno. S observa grieta en el contacto barra - resina		Bien hacia la barra y pequeña grieta hacia el tubo.		
	Aspereza/rugosidad	Liso al tacto	Liso al tacto	Liso al tacto		Liso al tacto		
	Presencia del envoltorio plástico	No apreciable	Se observa incluido en un gran sector de la masa de la resina, plegado completamente	A u lado de la barra se aprecia envoltorio plegado		Acumulación de envoltorio		
	Dureza	Los cristales de calcita y fluorita no lo rayan, pero la cuchilla con facilidad (dureza 5).	Los cristales de calcita y fluorita no lo rayan, pero la cuchilla con facilidad (dureza 5).	Los cristales de calcita y fluorita no lo rayan, pero la cuchilla con facilidad (dureza 5).		Los cristales de calcita y fluorita no lo rayan, pero la cuchilla con facilidad (dureza 5).		
	Observaciones							
BHCR - 38 - 2 - 2	Posición de la barra	Centrado						Gran parte fue utilizado para cortes longitudinales y ensayos en la FII.
	Porosidad	6 burbujas de 0,5 á 1,6 mm						
	Acoplamiento	Bueno tanto en la barra como en la pared del tubo						
	Aspereza/rugosidad	Liso al tacto						
	Presencia del envoltorio plástico	No apreciable						
	Dureza	Los cristales de calcita y fluorita no lo rayan, pero						

		la cuchilla con facilidad (dureza 5).						
	Observaciones							
<b>BHCR - 40 - 3 - 3</b>	Posición de la barra	Centrado	Ligeramente descentrado	Descentrado	Muy descentrado	SECCION UTILIZADA PARA PREPARAR PROBETAS	Muy descentrado	
	Porosidad	Se nota muy alterado	12 burbujas de diámetro menor a 0,5 mm	7 burbujas de 2 mm y de 0,8 mm	6 burbujas de 0,5 mm	SECCION UTILIZADA PARA PREPARAR PROBETAS	Cavidades alargadas junto a la pared del tubo y barra helicoidal	
	Acoplamiento	pobre	Bueno tanto en la barra como en la pared del tubo	Bueno tanto en la barra como en la pared del tubo	Bueno tanto en la barra como en la pared del tubo	SECCION UTILIZADA PARA PREPARAR PROBETAS	Regular	
	Aspereza/rugosidad	Liso al tacto	Liso al tacto	Liso al tacto	Liso al tacto	SECCION UTILIZADA PARA PREPARAR PROBETAS	Liso al tacto	
	Presencia del envoltorio plástico	No apreciable	plegado alrededor de la barra	Plegado a un lado de la barra	Plegado en distintas partes de la masa de la resina	SECCION UTILIZADA PARA PREPARAR PROBETAS	Acumulación de envoltorio plegado	
	Dureza	Los cristales de calcita y fluorita no lo rayan, pero la cuchilla con facilidad (dureza 5).	Los cristales de calcita y fluorita no lo rayan, pero la cuchilla con facilidad (dureza 5).	Los cristales de calcita y fluorita no lo rayan, pero la cuchilla con facilidad (dureza 5).	Los cristales de calcita y fluorita no lo rayan, pero la cuchilla con facilidad (dureza 5).	SECCION UTILIZADA PARA PREPARAR PROBETAS	Los cristales de calcita y fluorita no lo rayan, pero la cuchilla con facilidad (dureza 5).	
	Observaciones							

**D-3: ANALISIS DE LAS CARACTERISITICAS MACROSCOPICAS DE LA BARRA HELICOIDAL INSTALADA CON LECHADA DE CEMENTO**

MUESTRA	CARACTERISTICAS MACROCÓPICAS	SECCIONES						OBSERVACIONES
		0	1	2	3	4	5	
<b>BHLC - 33 - 4 - 1</b>	Posición de la barra	Muy descentrado	Muy Descentrado	Muy Descentrado	descentrado	SECCION UTILIZADA PARA PREPARAR PROBETAS	descentrado	
	Porosidad	14 poros de 1,33 á 1,82 mm	18 burbujas de 0,4 á 1,2 mm	11 burbujas de 0,3 á 1,1 mm	13 burbujas de 0,5 á 1,05 mm	SECCION UTILIZADA PARA PREPARAR PROBETAS	17 burbujas de 0,3 á 1,3 mm	
	Acoplamiento	Bueno tanto en la barra como en la pared del tubo	Bueno tanto en la barra como en la pared del tubo	Bueno tanto en la barra como en la pared del tubo	Bueno tanto en la barra como en la pared del tubo	SECCION UTILIZADA PARA PREPARAR PROBETAS	Bueno tanto en la barra como en la pared del tubo	
	Aspereza/rugosidad	Liso al tacto	Liso al tacto	Liso al tacto	Liso al tacto	SECCION UTILIZADA PARA PREPARAR PROBETAS	Liso al tacto	
	Presencia del envoltorio plástico	No lleva envoltorio	No lleva envoltorio	No lleva envoltorio	No lleva envoltorio	SECCION UTILIZADA PARA PREPARAR PROBETAS	No lleva envoltorio	
	Dureza	Los cristales de calcita y fluorita no lo rayan, pero si la cuchilla con dificultad (dureza > 5,5).	Los cristales de calcita y fluorita no lo rayan, pero si la cuchilla con dificultad (dureza > 5,5).	Los cristales de calcita y fluorita no lo rayan, pero si la cuchilla con dificultad (dureza > 5,5).	Los cristales de calcita y fluorita no lo rayan, pero si la cuchilla con dificultad (dureza > 5,5).	SECCION UTILIZADA PARA PREPARAR PROBETAS	Los cristales de calcita y fluorita no lo rayan, pero si la cuchilla con dificultad (dureza > 5,5).	
	Observaciones	Los poros son más prominentes que en la resina	Los poros son más prominentes que en la resina	Los poros son más prominentes que en la resina	Los poros son más prominentes que en la resina		Los poros son más prominentes que en la resina	
<b>BHLC - 36 - 4 - 1</b>	Posición de la barra	Descentrado	Descentrado	Ligeramente descentrado	Centrado	SECCION UTILIZADA PARA PREPARAR PROBETAS	Centrado	
	Porosidad	8 burbujas de 0,5 á 1,50 mm y 1 de 3,6 mm	13 burbujas de 0,5 á 1,7 mm y 1 de 6,1 mm	12 burbujas de 0,4 á 1,2 mm	9 burbujas de 0,4 á 1,0 mm	SECCION UTILIZADA PARA PREPARAR PROBETAS	18 burbujas de 0,3 á 1,7 mm	
	Acoplamiento	Bueno tanto en la barra como en la pared del tubo	Bueno tanto en la barra como en la pared del tubo	Bueno tanto en la barra como en la pared del tubo	Bueno tanto en la barra como en la pared del tubo	SECCION UTILIZADA PARA PREPARAR PROBETAS	Bueno tanto en la barra como en la pared del tubo	
	Aspereza/rugosidad	Liso al tacto	Liso al tacto	Liso al tacto	Liso al tacto	SECCION UTILIZADA PARA PREPARAR PROBETAS	Liso al tacto	
	Presencia del envoltorio plástico	No lleva envoltorio	No lleva envoltorio	No lleva envoltorio	No lleva envoltorio	SECCION UTILIZADA PARA PREPARAR PROBETAS	No lleva envoltorio	
	Dureza	Los cristales de calcita y fluorita no lo rayan, pero si la cuchilla con dificultad (dureza > 5,5).	Los cristales de calcita y fluorita no lo rayan, pero si la cuchilla con dificultad (dureza > 5,5).	Los cristales de calcita y fluorita no lo rayan, pero si la cuchilla con dificultad (dureza > 5,5).	Los cristales de calcita y fluorita no lo rayan, pero si la cuchilla con dificultad (dureza > 5,5).	SECCION UTILIZADA PARA PREPARAR PROBETAS	Los cristales de calcita y fluorita no lo rayan, pero si la cuchilla con dificultad (dureza > 5,5).	
	Observaciones	Los poros son más prominentes que en la resina	Los poros son más prominentes que en la resina	Los poros son más prominentes que en la resina	Los poros son más prominentes que en la resina		Los poros son más prominentes que en la resina	
<b>BHLC - 38 - 4 - 1</b>	Posición de la barra	Descentrado	Ligeramente descentrado	Descentrado	descentrado		Muy descentrado	
	Porosidad	6 burbujas de 0,5 á 2,1 mm	9 Burbujas de 0,4á 1,8 mm y 1 de 6,2 mm	15 burbujas de 0,6 á 1,3 mm y 1 de 5,2 mm	8 burbujas de 0,6 á 1,6 mm y una cavidad (cangrejera) de 24 x10 x 10,5 mm de profundidad	SECCION UTILIZADA PARA PREPARAR PROBETAS	14 burbuja de 0,4 á 0,8 mm, 1 de 1,7 y 1 de 3,9 mm	
	Acoplamiento	Bueno tanto en la barra como en la pared del tubo	Bueno tanto en la barra como en la pared del tubo	Bueno tanto en la barra como en la pared del tubo	Bueno tanto en la barra como en la pared del tubo	SECCION UTILIZADA PARA PREPARAR PROBETAS	Bueno tanto en la barra como en la pared del tubo	
	Aspereza/rugosidad	Liso al tacto	Liso al tacto	Liso al tacto	Liso al tacto	SECCION UTILIZADA PARA PREPARAR PROBETAS	Liso al tacto	
	Presencia del envoltorio plástico	No lleva envoltorio	No lleva envoltorio	No lleva envoltorio	No lleva envoltorio	SECCION UTILIZADA PARA PREPARAR PROBETAS	No lleva envoltorio	

	Dureza	Los cristales de calcita y fluorita no lo rayan, pero si la cuchilla con dificultad (dureza > 5,5).	Los cristales de calcita y fluorita no lo rayan, pero si la cuchilla con dificultad (dureza > 5,5).	Los cristales de calcita y fluorita no lo rayan, pero si la cuchilla con dificultad (dureza > 5,5).	Los cristales de calcita y fluorita no lo rayan, pero si la cuchilla con dificultad (dureza > 5,5).	SECCION UTILIZADA PARA PREPARAR PROBETAS	Los cristales de calcita y fluorita no lo rayan, pero si la cuchilla con dificultad (dureza > 5,5).	
	Observaciones	Los poros son más prominentes que en la resina	Los poros son más prominentes que en la resina	Los poros son más prominentes que en la resina	Los poros son más prominentes que en la resina		Los poros son más prominentes que en la resina	
<b>BHLC - 40 - 4 - 2</b>	Posición de la barra	Descentrado	Muy Descentrado	Muy Descentrado	SECCION UTILIZADA PARA PREPARAR PROBETAS	Descentrado	Muy descentrado	
	Porosidad	12 burbujas de 0,3 á 1,1 mm	16 burbujas de 0,5 á 1,5 mm	13 burbuja de 0,4 á 1,1 mm y 3 de 1,5 á 2,8 mm	SECCION UTILIZADA PARA PREPARAR PROBETAS	4 burbujas de 0,4 á 0,8 mm y 3 de 1,8 á 3,3 mm	21 burbujas de 0,5 á 1,8 mm	
	Acoplamiento	Bueno tanto en la barra como en la pared del tubo	Bueno tanto en la barra como en la pared del tubo	Bueno tanto en la barra como en la pared del tubo	SECCION UTILIZADA PARA PREPARAR PROBETAS	Bueno tanto en la barra como en la pared del tubo	Bueno tanto en la barra como en la pared del tubo	
	Aspereza/rugosidad	Liso al tacto	Liso al tacto	Liso al tacto	SECCION UTILIZADA PARA PREPARAR PROBETAS	Liso al tacto	Liso al tacto	
	Presencia del envoltorio plástico	No lleva envoltorio	No lleva envoltorio	No lleva envoltorio	SECCION UTILIZADA PARA PREPARAR PROBETAS	No lleva envoltorio	No lleva envoltorio	
	Dureza	Los cristales de calcita y fluorita no lo rayan, pero si la cuchilla con dificultad (dureza > 5,5).	Los cristales de calcita y fluorita no lo rayan, pero si la cuchilla con dificultad (dureza > 5,5).	Los cristales de calcita y fluorita no lo rayan, pero si la cuchilla con dificultad (dureza > 5,5).	SECCION UTILIZADA PARA PREPARAR PROBETAS	Los cristales de calcita y fluorita no lo rayan, pero si la cuchilla con dificultad (dureza > 5,5).	Los cristales de calcita y fluorita no lo rayan, pero si la cuchilla con dificultad (dureza > 5,5).	
	Observaciones	Los poros son más prominentes que en la resina	Los poros son más prominentes que en la resina	Los poros son más prominentes que en la resina		Los poros son más prominentes que en la resina	Los poros son más prominentes que en la resina	

## **ANEXO E**

**PARTE DEL INFORME DE LOS ENSAYOS REALIZADOS EN EL  
LABORATORIO DE MAQUINAS Y HERREAMIENTAS DE LA  
FACULTAD DE INGENIERIA INDUSTRIAL - UNMSM**





UNIVERSIDAD NACIONAL  
MAYOR DE SAN MARCOS  
Universidad del Perú, Decana de América

FACULTAD DE  
INGENIERÍA  
INDUSTRIAL



SINEACE  
SISTEMA NACIONAL DE EVALUACIÓN,  
ACREDITACIÓN Y CERTIFICACIÓN  
DE LA CALIDAD EDUCATIVA

Solicitante: Ing. E. Mauro Giraldo Paredes

Dirección: Pj. Los Jazmines Mz. M Lt. 03 M. Alto – Los Olivos

#### Material ensayado:

- Barra Helicoidal Cartucho de Cementicio-33-4-1
- Barra Helicoidal Cartucho de Resina 33-3-1
- Barra Helicoidal Lecha de Cemento 33-4-1
- Barra Helicoidal Cartuchos de Cementicio36-4-1
- Barra Helicoidal Cartuchos de Resina 36-3-1
- Barra Helicoidal Lechada de Cemento 36-4-1
- Barra Helicoidal Cartucho de Cementicio 38-4-3
- Barra Helicoidal Cartucho de Resina 38-2-2
- Barra Helicoidal Lechada de Cemento 8-4-1
- Barra Helicoidal Cartucho de Cementicio 40-4-3
- Barra Helicoidal Cartucho de Resina 40-3-3
- Barra Helicoidal Lechada de Cemento 40-4-2

#### Objeto de petición:

Ensayo de Caracterización de Materiales (Ensayo de Dureza, Ensayo de Rugosidad, Ensayo de Espesor de Ultrasonido, Tratamiento Térmico)

**Fecha de Recepción:** 06 de agosto del 2015.

**Fecha de Inicio del Ensayo:** 12 de agosto del 2015.

**Fecha de Finalización del Ensayo:** 21 de agosto del 2015.

**Fecha de Emisión del Informe:** 21 de agosto del 2015.





UNIVERSIDAD NACIONAL  
MAYOR DE SAN MARCOS  
Universidad del Perú, Decana de América

FACULTAD DE  
INGENIERÍA  
INDUSTRIAL

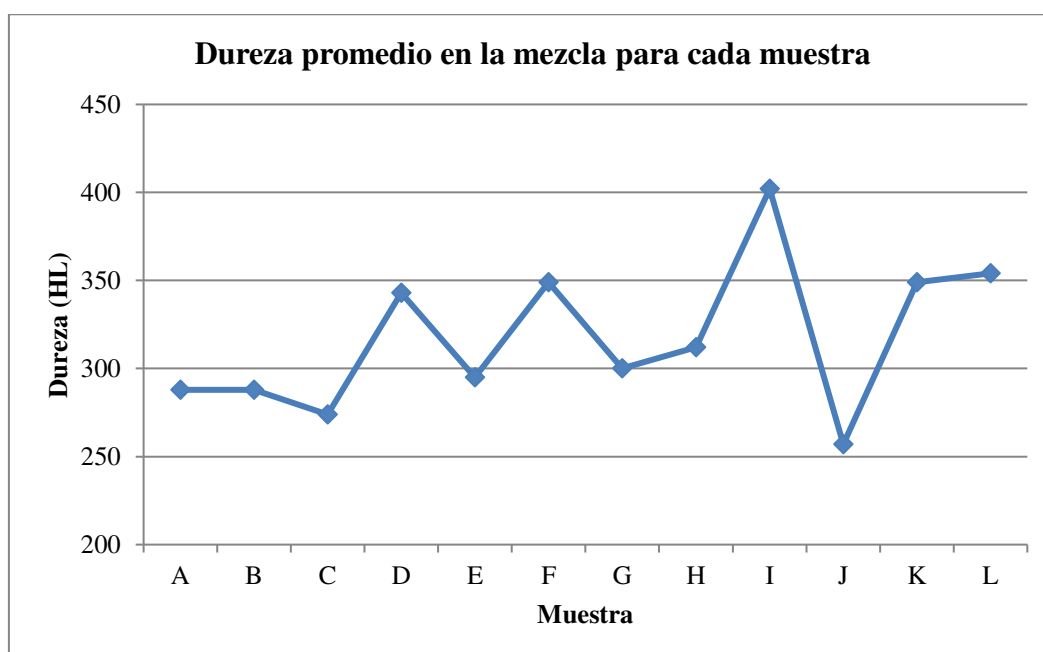
CNA  
CONSEJO NACIONAL DE ACREDITACIÓN  
República de Colombia



## ENSAYO DE DUREZA

Medidas iniciales de dureza en la mezcla

Código	Muestra	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Promedio
A	BHCC-33-4-1	193	82	194	86	139
B	BHCC-36-4-1	113	131	90	109	111
C	BHCC-38-4-3	302	231	232	258	256
D	BHCC-40-4-3	250	292	247	140	232
E	BHCR-33-3-1	141	137	178	97	138
F	BHCR-36-3-1	164	180	177	180	175
G	BHCR-38-2-2	93	87	111	87	95
H	BHCR-40-3-3	134	236	96	86	138
I	BHLC-33-4-1	173	193	173	213	188
J	BHLC-36-4-1	194	183	197	271	211
K	BHLC-38-4-1	192	185	175	191	186
L	BHLC-40-4-2	339	303	214	244	275





UNIVERSIDAD NACIONAL  
MAYOR DE SAN MARCOS  
Universidad del Perú, Decana de América

FACULTAD DE  
INGENIERÍA  
INDUSTRIAL

CNA  
CONSEJO NACIONAL DE Acreditación  
República de Colombia



SINEACE  
SISTEMA NACIONAL DE EVALUACIÓN,  
ACREDITACIÓN Y CERTIFICACIÓN  
DE LA CALIDAD EDUCATIVA

### Medidas iniciales de dureza de la barra helicoidal

Código	Muestra	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5	Promedio
A	BHCC-33-4-1	110	168	131	161	118	138
B	BHCC-36-4-1	184	214	215	215	235	213
C	BHCC-38-4-3	213	197	210	219	203	208
D	BHCC-40-4-3	221	289	216	269	217	242
E	BHCR-33-3-1	267	234	243	258	229	246
F	BHCR-36-3-1	287	208	226	217	214	230
G	BHCR-38-2-2	198	219	236	182	220	211
H	BHCR-40-3-3	197	208	210	236	190	208
I	BHLC-33-4-1	228	239	236	257	228	238
J	BHLC-36-4-1	223	224	225	234	229	227
K	BHLC-38-4-1	231	217	228	232	221	226
L	BHLC-40-4-2	247	248	238	245	262	248

